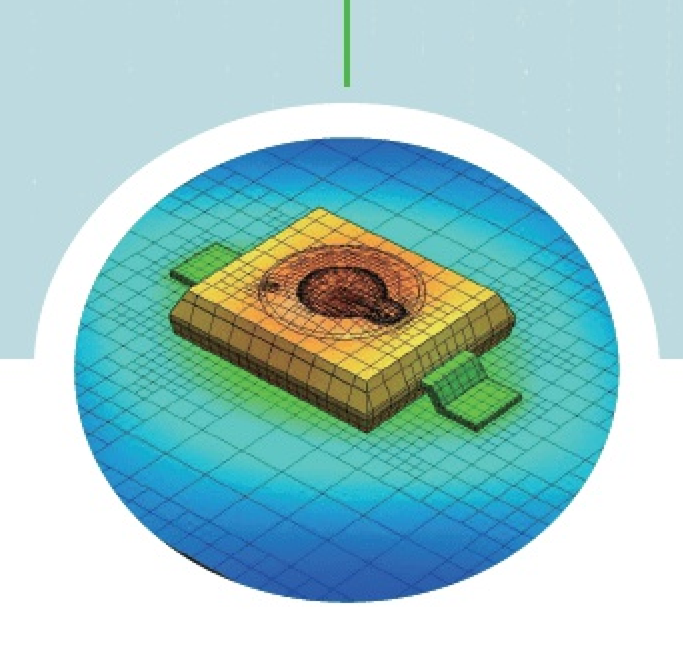




官方推荐用书

THERMAL MANAGEMENT OF LED'S PACKAGING AND LIGHT ENGINE



LED封装与光源热设计

柴广跃 李波 王刚 向进 编著

Chai Guangyue Li Bo Wang Gang Xiang Jin

清华大学出版社

电子信息与电气工程技术丛书

LED封装与光源热设计

柴广跃　李　波　王　刚　编著
向　进　审

清华大学出版社
北　京

内 容 简 介

本书系统论述了发光二极管的封装、灯具原理与热设计。全书共11章，分别介绍了LED热设计基础、传热学基础、LED芯片与热性能、LED封装与热设计、LED光源组件与灯具热设计、LED器件的瞬态热测试方法、LED器件瞬态热测试的实际操作、LED热仿真分析软件、LED组件热特性仿真分析、LED灯具热仿真分析等内容。

本书将LED器件封装及光源灯具技术、热设计基础理论及仿真工具、LED热特性测试与评估相关知识融会贯通为一体，为读者提供了有关LED封装与灯具热设计的基本原理与应用，集学术性与应用性为一体，可供相关科研与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

LED封装与光源热设计/柴广跃，李波，王刚等编著. —北京：清华大学出版社，2018
(电子信息与电气工程技术丛书)
ISBN 978-7-302-47024-3

Ⅰ. ①L…　Ⅱ. ①柴… ②李… ③王…　Ⅲ. ①发光二极管－封装工艺 ②发光二极管－光源－设计　Ⅳ. ①TN383

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第102038号

责任编辑：盛东亮
封面设计：李召霞
责任校对：白　蕾
责任印制：宋　林

出版发行：清华大学出版社
网　　址：http://www.tup.com.cn，http://www.wqbook.com
地　　址：北京清华大学学研大厦A座　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**邮　　购**：010-62786544
投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn
课件下载：http://www.tup.com.cn，010-62795954
印 装 者：三河市国英印务有限公司
经　　销：全国新华书店
开　　本：185mm×260mm　　**印　　张**：23.25　　**字　　数**：544千字
版　　次：2018年9月第1版　　**印　　次**：2018年9月第1次印刷
定　　价：89.00元

产品编号：069373-01

前言

以 LED 为核心的半导体照明技术发展迅速，正以超乎人们想象的速度替代传统的电光源。LED 的核心是 pn 结，基于 pn 结的半导体器件具有很强的温度敏感性，随着工作温度的升高，它们的性能变差、可靠性劣化、故障率升高、寿命缩短。目前，商品化 LED 的光电效率远远达不到 50％，LED 正常工作时自身将产生大量的热量，如不将此热量散去将对 LED 产生灾难性的后果。本书结合 LED 封装和灯具设计制作的实际情况，介绍了热设计的基本原理与方法、热特性的评估方法与手段，最后介绍了一种流行的热特性仿真软件。目前，关于半导体照明的参考书籍非常多，但是相关的本科教材却非常匮乏，因此本书的编写致力于解决目前国内缺乏“光源与照明”相关专业基础教材的问题。与现有相关书籍相比，本教材侧重于基础知识介绍，同时希望通过大量的实例分析触发读者创新的灵感。参与编写的人员既有高校教师，也有来自企业的研发人员。希望从学习、研究、产业等不同角度进行问题的梳理，从而帮助读者对 LED 封装与照明灯具技术以及所涉及的热问题有较为全面的了解，并掌握基本的分析方法和手段。

本书层次分明，分为上中下三篇。由柴广跃教授和向进高级经理提出了书稿的编写大纲和目录，并对全部书稿进行了审定。

本书上篇为 LED 热设计基础，共 5 章，由柴广跃教授编写。

第 1 章主要介绍 LED 封装与照明技术发展过程、与热相关的 LED 失效、热设计的必要性及基本流程。

第 2 章主要介绍传热学基础知识，内容包括热的概念、传热机理和基本的定理、热阻概念、热分析的基本方法，最后介绍了几种先进的散热技术。

第 3 章主要介绍 LED 基本原理与热性能，内容包括 LED 基本结构及发光发热的机理、LED 芯片结构及热特性。

第 4 章主要介绍 LED 封装与热设计，内容包括 LED 封装的基本概念、封装的类别及基本方法，最后介绍了 LED 封装的热设计方法。

第 5 章主要介绍半导体照明光源组件与灯具的热设计，内容包括光源组件与灯具的定义、几种典型的光源与灯具、光源与灯具的热设计方法，最后介绍了几种典型 LED 光源与灯具的热设计实例。

本书中篇为 LED 热特性测试方法及测试平台，共 2 章，由王刚高级工程师编写。

第 6 章主要介绍了 LED 器件热特性的瞬态测试，包括 LED 热特性测试的难点、LED 热阻与结温的计算方法、瞬态测试原理与方法等内容。

第 7 章主要介绍了瞬态法测试的实际操作过程，包括进行瞬态热测试所需要的准备工作、实际操作等内容。

本书下篇为 LED 热设计仿真工具原理与应用，共 4 章，由李波高级工程师编写。

前言

第 8 章主要介绍 FloEFD 流体仿真软件的基本情况，内容包括 FloEFD 的基本原理、主要优点、工程应用、软件的安装、应用流程、FloEFD 各个模块的介绍。

第 9 章以一种 LED 组件为例，详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 器件与组件热特性的完整过程。

第 10 章以一种 LED 灯具为例，详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 灯具热特性的完整过程，并讨论了如何通过调整对流和辐射参数来调整 LED 灯具中 LED 器件的结温。

第 11 章以一种带有风扇的 LED 射灯为例，详细介绍了使用 FloEFD 流体仿真软件模拟仿真 LED 射灯热特性的完整过程，并讨论了如何通过调整风扇参数改善灯具散热能力。

附录 A 由李波高级工程师完成，附录 B 由王刚高级工程师完成。

本书论述深入浅出，注重理论与实践相结合。可作为高等院校相关专业的教材和参考书，也可作为半导体照明行业从业人员及相关工程技术人员的参考资料。

在本书编辑过程中，深圳大学、相关企业、相关网站、行业的专家及学生李华平、章瑞华、李耀东、廖世东、苏丹等给予了大力支持，为本书提供了大量有益的背景资料；传热学基础部分参考并引用了夏班尼所著的《传热学》部分内容与例题；学生刘志慧、刘梦媛帮助作者整理了全部书稿，马雁潮、陈晓媛、徐竟、廖刚也为书稿整理和插图做了大量的工作。在此一并感谢。

本书的出版得到了美国 Mentor 公司的大力支持，感谢 Mentor 公司的资助和技术支持。对于 Mentor 公司的产品和大学计划有兴趣的读者，可以通过 Email 和向进联系：jin_xiang@mentor. com。

还要感谢清华大学出版社的工作人员为本书出版所做的大量工作，特别是盛东亮责任编辑以严谨的作风、认真细致的工作态度、良好的合作精神圆满完成编辑工作，使本书得以高质量出版。

由于作者水平有限，本书难免有不妥和错误之处，恳请读者批评指正。

作　者

2018 年 6 月

目录

上篇　LED 热设计基础

目录

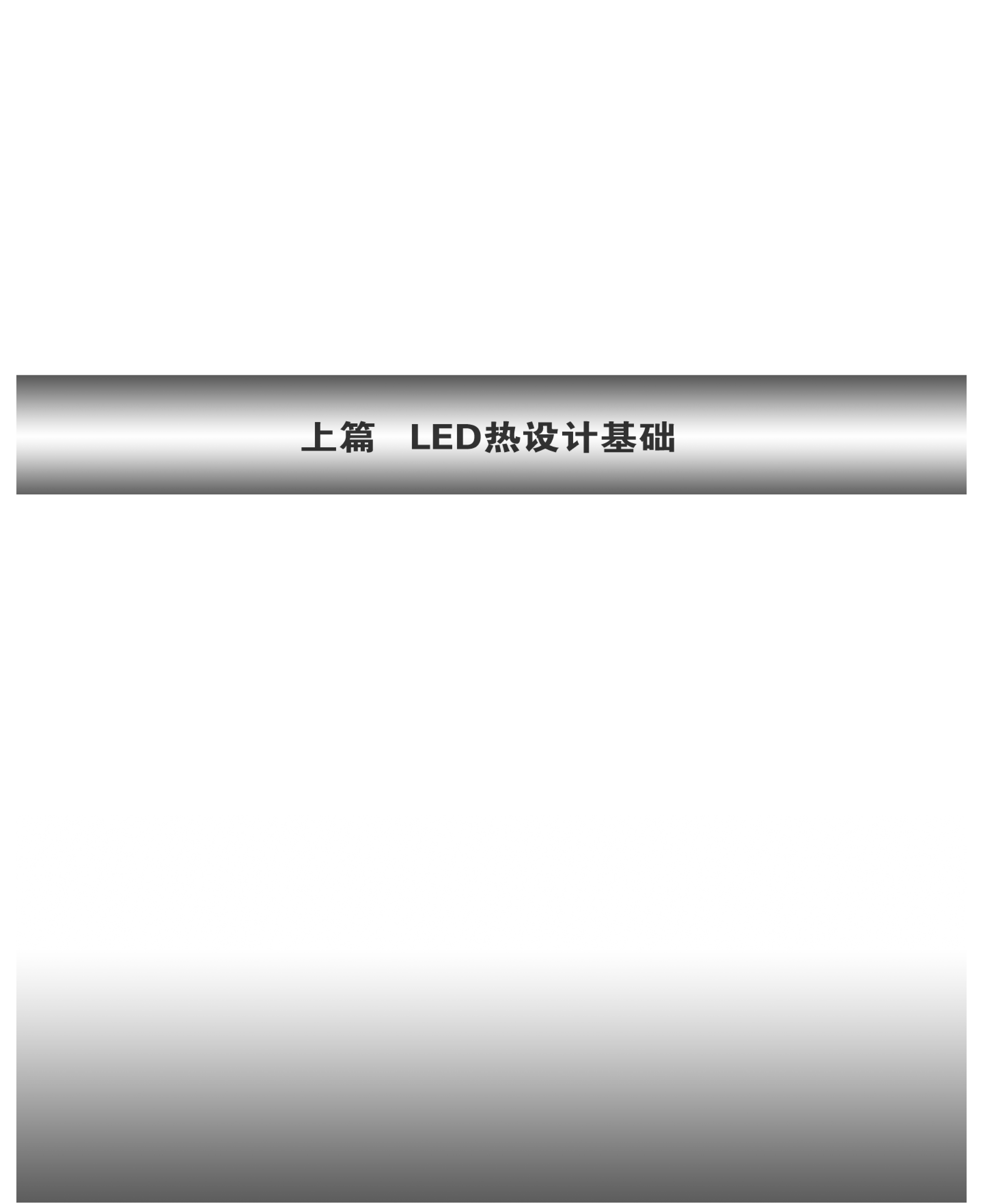
目录

目录

下篇　LED 热设计仿真工具原理与应用

目录

目录



上篇　LED热设计基础

第1章 引 言

以发光二极管(light emitting diode,LED)为核心的新一代半导体照明(semiconductor lighting)也称为固态照明(solid state lighting,SSL),是一种安全健康的"绿色光源",节能环保效果非常明显。2007年美国《自然》杂志发表文章称:照明占全球能源消耗的8.9%、电力消耗的19%,对GDP的贡献率仅是0.63%。如果采用半导体照明技术,有望使2050年的照明用电量仍维持2007年的水平,而对GDP的贡献率将上升至1.63%。世界主要发达国家从战略高度对半导体照明产业进行了布局,大力发展半导体照明技术,构筑专利壁垒,同时发布白炽灯等低效照明光源的禁限令及禁限时间表,极力促成世界照明工业的转型与新兴照明产业的崛起。究其原因,除了经济利益的考量外,社会经济的绿色可持续发展已经成为世界各国的治国之本,正在成为全人类的共识。目前,人类面临的最大挑战之一是如何控制碳排放引起的全球变暖问题。为此,联合国气候变化特别谈判通过了《京都议定书》等一系列文件,这是具有约束力的世界性协议,用科学方法决定了全球整体的排放目标及各个成员国的减排目标及时间表。我国政府于2009年郑重承诺:到2020年单位GDP的二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。这些约束性指标已经写入我国国民经济和社会发展的中长期目标中,半导体照明已经成为完成这一伟大目标的重要手段之一。

1.1 LED技术的发展

1907年H.J.Round首次发现在10V电压下碳化硅(SiC)晶体发出微弱的可见光。1923年Losseve将电流注入意外形成的SiC的pn结,在结区发出了微弱的蓝光。1936年Destriau发现在注入电流作用下硫化锡(SnS)粉末可以发光。

1962年,美国通用电气公司的尼克·霍洛亚克(Nick Holonyak)在半导体化合物砷化镓衬底上气相外延(vapour phase epitaxy,VPE)生长了铝镓砷(AlGaAs/GaAs)材料,发明了第一只红色可见光LED,开启了LED的历史,发光效率接近0.1lm/W。1969年Nuese在GaAs衬底上生长了具有一定厚度的n型AlGaAs缓冲层,大幅减少

了有源层的缺陷，有效地提高了红光 LED 的发光效率。由于 LED 的寿命长、抗震性能好，开始用作指示灯。

1968 年，人们将掺杂工艺应用于 GaP、AlGaAs 材料，研制出了光效更高的 LED，发光颜色也从单一的红光覆盖至绿光、橙光和黄光。

20 世纪 80 年代是 LED 发展的黄金年代，新的化合物材料、双异质结和金属氧化物化学气相外延(MOCVD)等技术的引入使 LED 技术获得高速的发展。80 年代初，日本名古屋大学的赤崎勇和天野浩选择氮化镓(GaN)材料研制蓝色 LED。1988 年开始，日本日亚化学工业株式会社(Nichia Corporation)的中村修二(Shuji Nakamura)也开始使用氮化镓材料研发蓝光 LED，但在技术路线上并不相同。1993 年，中村修二开发出了首个可商用的高亮度蓝光 LED。与之前发明的红、绿光 LED 混光合成出白光。1997 年，Schlotter 研究小组、Nakamura 研究小组分别使用蓝光 LED 加黄光荧光粉封装成功白光 LED。为此，赤崎勇、天野浩和中村修二获得 2014 年度诺贝尔物理学奖，诺奖评选委员会认为，他们研发蓝色发光二极管，并用全新方式创造的白色光源已经让所有人受益，他们革命性的发明将点亮 21 世纪，掀起新一代照明的革命。

2001 年，Kafmann 等人用紫外 LED 激发三基色荧光粉的方法得到了空间色参数均匀的白光 LED。

2007 年，日亚化学工业株式会社发布了一种 1W 级白光 LED，该 LED 芯片的尺寸为 $1mm^2$，在电流为 350mA 时的光效约为 134lm/W，与之对应的光电转换效率为 39.5%，色温为 4988K，接近一般照明设备的 5000K。

2014 年商用功率型白光 LED 的发光效率超过 160lm/W，实验室样品发光效率已经超过 300lm/W。

20 世纪 90 年代中期以来，LED 技术迅速发展。类似微处理器产业中的“摩尔定律”，LED 产业发展存在“Haitz 定律”，这一定律以安捷伦的前任技术科学家 Roland Haitz 的名字命名，它指出：LED 的价格每 10 年降为原来的 1/10，性能每 10 年提高 20 倍。图 1-1 为 LED 照明与其他电光源技术发展的参数对比示意图，由图可见传统电光源的光效很难超过 120lm/W，半导体照明的光效可以超过 200lm/W，而达到这一光效仅仅用了不到 25 年。

芯片技术的发展为 LED 产业的发展打下了坚实的基础，封装技术的不断革新也促进了 LED 不断拓展至新的应用领域。

LED 封装是实现 LED 照明的关键环节，用于保护芯片不受外界环境的影响，提高可靠性并完成与外电路的电气连接。此外，LED 封装还要保证光学性能，提高出光效率并实现特定的光场分布。

LED 封装技术的发展大致可分为四个阶段：

(1) 1962—1989 年，LED 封装形式上一般采用直插式封装，直径多为 $\phi3$ 和 $\phi5$。驱动电流一般不大于 20mA，主要用作信号指示和显示；

(2) 1990—1999 年出现了大光通量的食人鱼型封装 LED，相比直插式两引脚 LED，4 引脚食人鱼型 LED 发光角度大于 120 度，发光强度更高，而且能承受更大的功率，同时

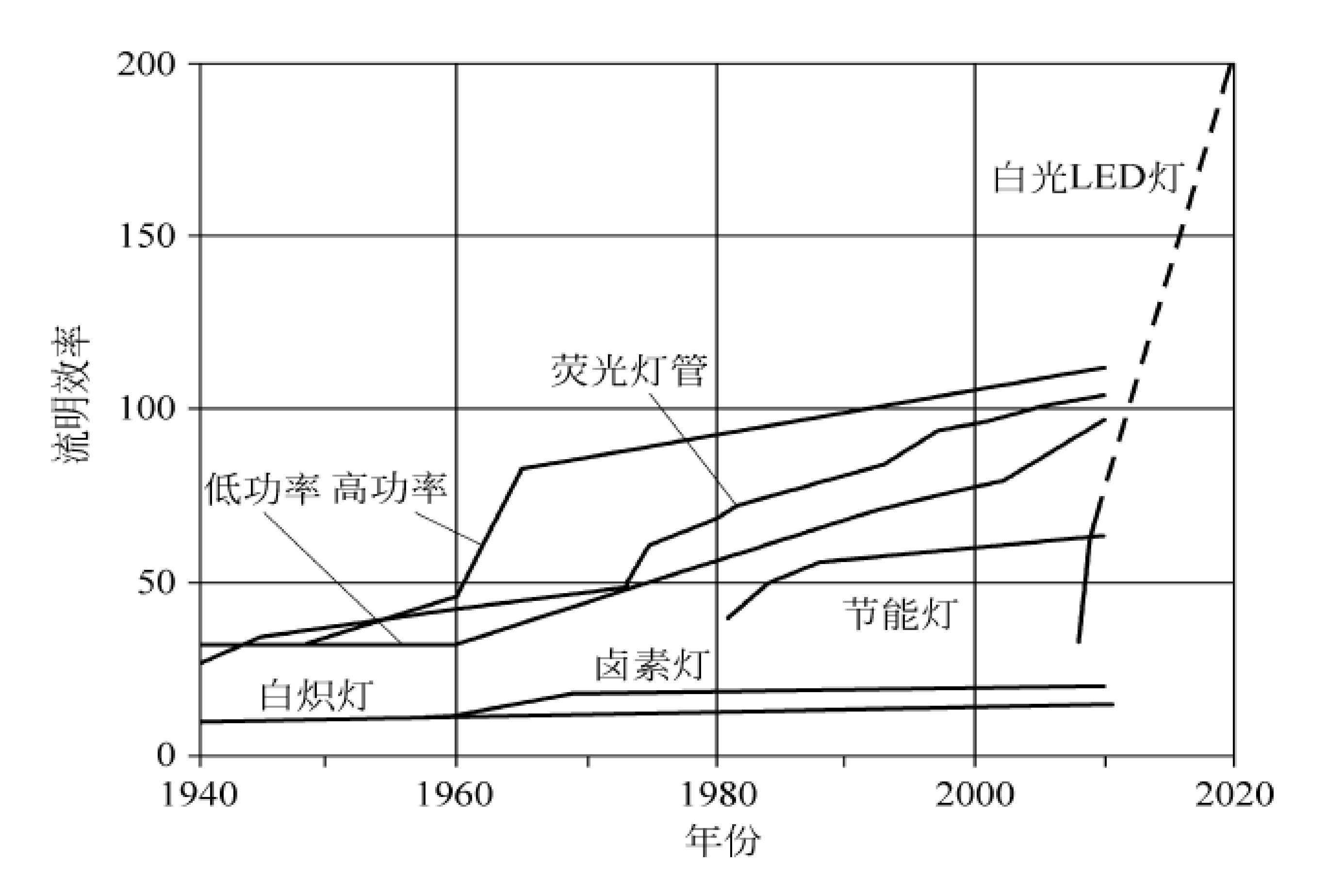


图 1-1　LED 照明与其他电光源技术发展的参数对比示意图

散热更好，其驱动电流在 50～150mA，主要用作大型信号指示，如汽车信号灯、景观照明灯等；

(3) 2000 年开始的第三阶段，开发出各种大功率 LED，包括单颗封装和多颗集成封装，单颗的驱动电流大于 350mA；

(4) 2010 年后随着倒装(flip chip)LED 芯片的逐步实用化，在封装技术上也出现了芯片级封装 LED 器件，将荧光粉保型涂覆在芯片外后直接使用，典型的包括 PFC、POD 等，但是，在光效指标上还未达到相同功率的正装器件的水平。

目前，蓝光 LED＋黄色荧光粉是合成白光光源最流行、成本最低的方式，其发光效率已经超过 300lm/W(2014 年实验室水平)，显色指数达到 90 以上，半导体照明已经开始广泛进入通用照明市场。

LED 的技术特点使之特别适合于照明应用，例如：

(1) LED 是芯片尺寸 mm^2 量级、驱动电压仅 2.0～3.5V 的全固态光源，易实现防震、防水设计，无触电危险，容易达到安全标准；

(2) 色彩丰富、色域宽、易调光、易调色、响应速度快、易实现智能化与网络化的控制，满足各种需求；

(3) 光效高，节能省电；

(4) 无毒、无害、可回收利用，绿色环保。

半导体照明技术正处于快速发展时期，就 LED 的发光效率来看，2014 年商用的功率型白光 LED 发光效率已经超过 160lm/W，每年的光效提升量约为 10～20lm/W，预计 2018 年商用功率型白光 LED 的发光效率将达到 260lm/W 左右。同时，器件价格不断下降。目前，每千流明 LED 的价格约为 50～60 元，2018 年将下降到现在的 1/3。世界主要半导体照明企业的功率型白光 LED 技术发展水平见表 1-1。半导体照明技术及其产品正向更高光效、更低成本、更可靠、更多元化的方向发展。此外，半导体照明的应用领域也将不断拓展，未来超越照明的应用将具有巨大的发展前景。

表 1-1　世界主要半导体照明企业的功率型白光 LED 技术发展水平

企业名称	350mA 下光效（研发水平）	350mA 下光效（产品水平）	时　间
中国大陆地区企业	40～50lm/W	30～40lm/W	“十五”末
	120lm/W	100～110lm/W	“十一五”末
	150lm/W	130lm/W	2013.04
美国 Cree	276lm/W	130～160lm/W	2013.04
美国 Lumileds	250lm/W	130lm/W	2013.04
德国 Osram	250lm/W	130lm/W	2013.04
日本 Nichia	250lm/W	130～150lm/W	2013.04
韩国首尔半导体	250lm/W	120～140lm/W	2013.04
中国台湾 Epistar	230lm/W	120～140lm/W	2013.04

注：数据来源于国家半导体照明工程研发及产业联盟(2013)。

1.2　LED 的失效

如同集成电路一样，LED 器件的故障也是主要由热引起的。这里的热包括两种含义：其一为工作在高温下的热环境；其二为即使工作环境为正常的温度，但是由于芯片、封装、应用系统的“热阻”使得芯片 pn 结处的温度(简称为结温)很高。研究表明结温与环境温度存在对应的关系，由系统的热阻进行关联。由于半导体器件的效率总是低于 100%、芯片材料电阻率不为零等因素，使得一部分输入电功率转换为热，造成在正常机械条件、正常工作电流下的失效。

LED 应用产品得以快速发展，并以超出人们想象的速度渗透到工业、农业、国防及人们的日常生活中，其中一个重要的原因是可靠性高。所谓“可靠性”是指：在规定的条件及规定的时间内产品完成规定功能的能力。衡量可靠性的指标包括：可靠度、故障率、失效率、平均寿命和平均修复时间。研究发现无论是(光)电子器件还是(光)电子系统，其可靠性均遵循“浴盆曲线”规律，即产品的早期有一个高失效的时间段，之后维持一段相当长时间的低故障率、低失效期，再往后又出现了一个高故障率的时间段，直至寿命终止。研究发现造成早期失效的主要原因是(光)电子元器件、PCB 板等原材料存在缺陷，以及生产工艺组装不良，这些缺陷产品可以通过出厂前的老化过程剔除。过了早期失效的阶段后，电子产品进入了浴盆曲线的盆底区域，造成该阶段产品失效的主要原因是产品中个别元器件、部件的随机失效，通常把该段维持的时间叫做产品的使用寿命。最后阶段的高故障率主要是因为构成产品的元器件及材料过了使用寿命开始加速老化，并逐渐失去原有的功能。

电子产品可靠性已经成为一门专门的学科，不再局限于对已经完成的产品进行的各种老化筛选、生产过程中各个环节的检验和试验，已经深入到了产品设计与规划阶段。研究发现由于产品设计缺陷造成的产品失效率约占总失效率的 40%以上，零部件缺陷引起的失效占比约为 30%，制作工艺缺陷引起的失效占比约为 20%，产品运输、使用、维护失误引起的失效占比约为 10%。产品设计阶段与可靠性相关的设计包括：电子系统热

仿真设计、EMC(电磁兼容)设计、SI(信号完整性)设计、PI(电源完整性)设计等。

以LED为代表的光电子器件和以集成电路(integrated circuit,IC)为代表的电子器件构建的系统已经成为信息社会不可或缺的基本要素,与我们的工作、生活息息相关。这些器件的核心是pn结(pn junction),基于pn结的半导体器件均具有温度敏感性,即随着工作温度的升高它们的性能变差、可靠性劣化、故障率升高、寿命缩短。而且,由于它们的工作效率达不到100%,并且器件材料与电极结构均具有一定的电阻率,导致了正常工作时将产生大量的热量。现代的光电器部件,特别是电子器部件的芯片功率越来越大、集成度越来越高,如奔腾4中央处理器(central processing unit,CPU)内部约有4200万个晶体管,封装在几个平方厘米的micro BGA管壳中,IC芯片的热设计功耗达到84W左右,热流密度达到每平方厘米几百甚至上千瓦特。耗散的热功率P满足如下公式

$$P = \frac{CV_{pk}^2}{2} f \tag{1-1}$$

式中,C为输入电容;V_{pk}为峰值电压;f为工作频率。由此公式可知在耗散热功率一定的前提下,降低芯片的电容与工作电压均可提高芯片的工作频率。奔腾4中央处理器芯片采用1.4V工作电压和亚微米光刻工艺(90nm线宽),降低了芯片峰值电压和电容值,使奔腾4芯片达到了提高工作频率、降低耗散功率的目的。同时在封装上采用低热阻的管壳和封装工艺,应用中采用带有电风扇的主动散热系统,从而确保芯片产生的热量快速、完全地通过管壳和散热器传递至空气中,保证芯片中各个晶体管pn结的温度处于安全的范围内。目前,LED应用系统中,维持LED显示屏正常工作所消耗电能的约80%~90%、半导体照明灯具正常工作所消耗电能的约70%转换成了热量,随着LED光效的持续提高,所产生的热量会逐步减少至50%左右。由此可见,LED的热设计依然是LED封装与应用系统设计中的一个重要问题。有资料研究表明引起电子与光电子系统失效的原因中热的因素约占70%以上。

通用的半导体照明灯具是普通的消费品,热设计完全照搬常规工业品设计是不适宜的。LED灯具设计应遵循简约、美观、有效、低成本的原则,通常LED灯具的外壳又兼有散热器作用。所以,LED灯具热设计中除了考虑快速传热、高效散热外,良好的美学设计、人体工学设计也必不可少。此外,还要考虑散热器对人体可能的伤害。

1.2.1 机械失效

机械失效包括变形、屈服、裂缝、断裂及不同材料间的剥离。典型机械失效的情形如材料所受力高于材料的屈服强度、不同材料间的受力超过材料间的剪切力均可产生机械失效。

正常情况下LED器件的机械失效主要是由于器件中不同材料的热膨胀系数(CTE)失配造成的。表2-1给出了典型的LED器件封装材料的热膨胀系数,它定义为材料单位温度变化所引起的材料单位长度的膨胀或收缩量,如下式所示:

$$\alpha = \frac{1}{l}\left(\frac{\partial l}{\partial T}\right)_P \tag{1-2}$$

式中,l为材料的长度;T代表温度;P代表压强。此式表明热膨胀系数α是在恒压条件

下测得的，材料长度的变化仅由温度的变化所致，单位为 $ppm/℃$（$ppm=10^{-6}$）。称因温度变化引起的材料长度变化为热应变，由此引起两个材料间的压缩力或伸张力为热应力。

常见的 LED 与温度相关的机械失效包括

（1）键合点的疲劳失效：LED 封装中通过键合引线连接芯片电极与支架电极，并使用透明环氧树脂或硅胶密封兼做透镜。温度剧烈变化时，芯片、支架与胶水之间的热应变产生的热应力造成键合引线与芯片或支架电极的脱离或键合点的疲劳断裂。

（2）键合引线的疲劳失效：同（1）所述，温度剧烈变化时，胶体作用在键合引线上的热应力也会造成引线的疲劳直至失效。

（3）芯片的失效：LED 芯片有源层材料包括 GaAs、GaN 及它们的三元或四元化合物，支架或基板材料多用金属铜、铝或是陶瓷。温度剧烈变化时，在芯片中央形成拉应力，四周形成剪切力。这些热应力将影响 LED 芯片的性能，当超过芯片的临界屈服强度时将造成芯片的断裂、失效。

（4）粘接层的疲劳失效：粘结层是指将 LED 芯片连接到支架或基板上的过渡层，可以是各种胶水，也可以是各种焊料（对于焊料，更习惯地称为焊接层）。由于芯片、支架或基板以及胶水或焊料的热膨胀系数不同，温度变化时的热应力将使得粘接层产生疲劳裂纹直至脱落失效。

（5）支架的疲劳失效：使用最多的 LED 支架由冲压的金属电极外部模压塑料构成，金属、塑料、芯片的热膨胀系数相差接近一个数量级。由于芯片贴片、使用中的焊接等工艺温度均高于 200℃，室温使用时的张应力容易造成塑料模料开裂形成细微裂纹，甚至崩裂失效。

（6）透镜的疲劳失效：与 IC 不同，LED 的输出量为光信号。光信号通过安装在支架或基板上的透镜输出，LED 的透镜多是采用透明环氧树脂、硅胶或 PPA 等材料模塑在支架或基板上。透镜材料与支架或基板材料的热膨胀系数也是相差接近一个数量级。温度剧烈变化时，也将在透镜与支架处产生很大的切向应力，在连接处甚至透镜上产生应变裂纹，影响光电性能甚至失效。

1.2.2 腐蚀失效

由于材料表面与环境介质发生化学或电化学反应而引起材料的破坏或变质称为材料的腐蚀。化学腐蚀是指金属表面与周围介质发生化学作用而引起的破坏，其特点是在作用过程中没有电流产生，如金属铝在空气中的氧化、金属在非电解质中的腐蚀都属于化学腐蚀。电化学腐蚀是指金属表面与周围介质发生电化学作用而引起的破坏，其特点是介质中有能导电的电解质溶液存在，腐蚀过程中有电流产生，这类腐蚀最普遍，包括大气腐蚀、土壤腐蚀、海水腐蚀、电解质溶液腐蚀和熔融盐腐蚀。这些腐蚀均对温度敏感，温度的升高可以大大加快腐蚀的速率。LED 封装中涉及的腐蚀失效主要为电化学类腐蚀失效，包括以下几种：

（1）金属电极的腐蚀失效：这是由于 LED 芯片、器件电极处存在诸如 Cl^-、Na^+ 离子和水汽分子，造成相邻电极间产生漏电通道。特别是器件内部的温度低于露点时，水蒸

气的凝结加剧了这种腐蚀。器件工作时结温升高可以缓解封装内的“潮湿”现象，即可以减缓这种腐蚀过程，所以，LED器件的长期存放会增大腐蚀失效的可能性。器件内部的这些导电离子可能是由于芯片、支架处理过程不合理造成的，也可能是诸如各种胶水、支架模压塑料纯度不够而自身携带，也有可能是工作过程中不良的工作环境在器件表面淀积部分离子，之后逐步扩散至电极开始腐蚀。

（2）应变裂纹加剧的腐蚀失效：如前所述，封装中各种材料热膨胀系数的不同会在不同材料的结合部位产生热应力与热应变，造成粘接层、透镜结合部及透镜本身存在细微的裂纹。芯片焊接过程使用纯度不够的助焊剂带有许多导电离子，其他一些工艺过程也可能造成这种“离子污染”。无论是封装过程还是正常工作时的高温环境都将使离子借助这些“微细的裂纹通道”加快向电极的“渗透”过程，从而加剧了这种腐蚀失效。

1.2.3 电气失效

电气失效是指影响电子器件或设备电器性能的失效，这种失效可以是断续的，也可以是持续的。LED常见的与温度相关电器失效如下：

（1）热逸溃引起的熔毁失效：由于电极材料不均匀等因素造成的LED微分串联电阻随着结温的上升而变大，应用恒压源驱动时，随着结温的升高LED开启电压减小，驱动电流将持续增加。若LED器件及系统不能快速有效地将热量导出，这种正反馈将使结温持续升高，最终熔毁LED。

（2）加速离子污染引起的失效：LED芯片制备、封装、应用各个工艺环节都会被某些带电离子污染，一般离子的迁移率随着温度的升高而加快，带电离子的迁移将会降低器件的性能，甚至引起器件的失效。

（3）加速电迁移引起的失效：LED器件特别是封装中的焊料与键合引线焊点，高温加速了某些高迁移率原子（如银、铝等）的运动速度，迁移而留下缝隙甚至生长为空洞，加大了器件的热阻与电阻，甚至造成短路，引起失效，高的电流密度会加速这种迁移。

（4）加速缺陷迁移引起的失效：外延生长LED器件有源层中存在缺陷，特别是基于蓝宝石衬底LED的缺陷密度更大，高温将加速缺陷攀爬的速度，甚至贯穿整个有源层形成局部的短路通道，劣化了LED的性能、降低了寿命，甚至引起快速失效。

1.2.4 光学失效

光学失效是指影响光电子器件或设备光学性能的失效，这种失效一般是持续的。LED常见的与温度相关的光学失效如下：

（1）高温加速荧光粉的失效：积累在LED芯片外的热量将会降低荧光粉的量子效率，造成色温漂移的同时导致了荧光粉温度的进一步提高，直至荧光粉发生降解引起失效。

（2）高温加速胶体的光学失效：积累在LED芯片外的热量将会降低胶体的光学与机械性能，导致胶体与支架反光层的剥离及胶体自身的龟裂，加速了环氧树脂胶水的黄化，导致光学性能的劣化甚至失效。

1.3 热设计的重要性

与所有半导体电子器件一样，LED 也有最高允许的结温，该温度与 LED 器件所用材料、制作工艺等因素有关，芯片厂商会提供该值。使用中如果超过该温度值，将不能保障 LED 的预期性能与寿命。所以，使用中必须给予 LED 良好的散热以保障其工作在低于规定结温的环境中。随着 LED 芯片及集成封装功率越来越大，LED 器件或组件所散发的热量越来越多，需要更快的热传导能力及使用更加有效的对流、辐射散热技术，甚至更高效的冷却技术，方可保证 LED 芯片的结温保持在规定的范围内。

随着结温的降低，LED 的性能会变的更佳，如光效更高、输出光功率更大、故障率更低、寿命更长。此外，良好的热设计还能减少能耗、消除噪声、降低系统的成本。早期设计的一些大功率 LED 灯具，如路灯、工矿灯等使用小型风扇散热，虽然提高了散热能力，但是，也同时带来了风扇的噪声及维持风扇工作的额外能量消耗，类似风扇类运动部件的引入也将缩短 LED 灯具的整体寿命。因此，合理的热设计是在保证满足所需要的散热效果的前提下结构最简单、材料用量最少的设计。

1.4 热设计流程

热设计流程是指利用恰当的导热与散热技术，或者辅以部分必要的机械、电器的手段，在必要的情况下甚至冷却 LED，有效地降低 LED 器件的结温，使之工作在规定的结温范围内。一般将 LED 灯具的热设计归纳到可靠性设计中，可靠性设计的另外一个问题是防静电设计。LED 灯具的设计包括光学设计、电路设计、结构设计、可靠性设计和安全设计五个方面。

需要注意，热设计过程是个持续的过程，热设计工程师提出的热设计方案不是一成不变的。与结构设计、电路设计、光学设计等类似，热设计应贯穿于产品设计的全过程。即热设计工程师应当参与产品设计的全过程，清楚并确保影响器件性能的关键部位，在基本满足机械、光学、电学参数和可靠性、安全性要求的前提下，提出初步的热设计方案，并能够在此后产品的不断完善的过程中有效调整热设计，满足产品的热设计要求。这种按照各个学科领域彼此配合原则进行的热设计会消除或减小后续设计中做出重大改变的风险，在设计的初期阶段对热设计进行调整更容易，也更为经济。随着产品研发进程的深入，设计方案调整的难度会逐步加大，实施成本也在逐步提高。这就要求设计开始时应综合考虑光、电、热与机械的所有要求，提出总的设计原则，尽量减少开发过程中做出重大的设计改变。对于 LED 灯具设计而言，在设计中还需要考虑人体工学的设计，特别是美学设计，由于灯具热性能往往与外观结构的设计密切相关，这也就造成了 LED 灯具热设计往往与美学折中。

半导体照明产品热设计流程如图 1-2 所示，热设计始于产品的需求分析，设计者应明确：

(1) 产品面向何种市场；

(2) 产品的工作环境；

(3) 产品应符合何种工业标准；

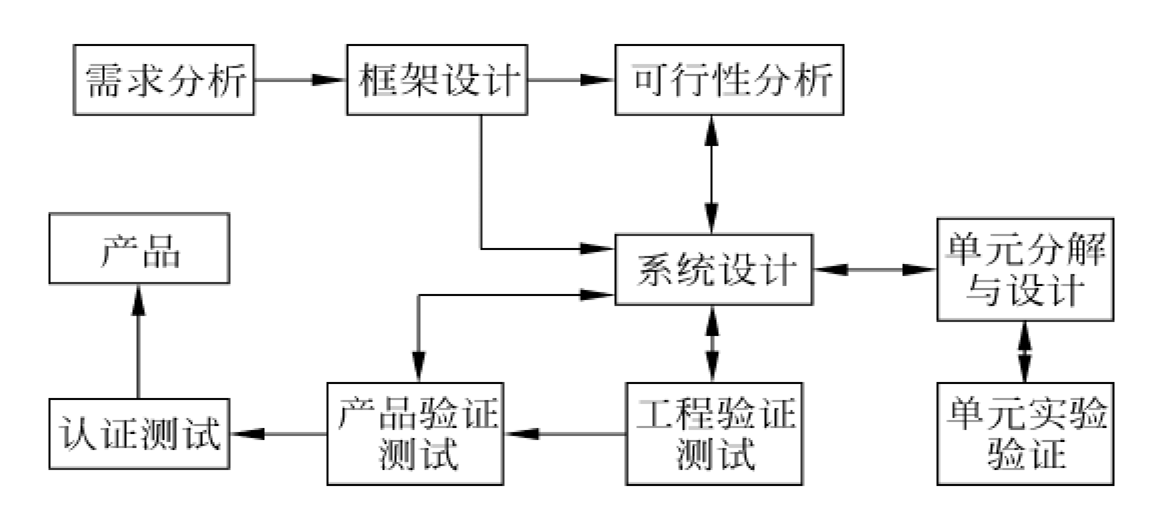


图 1-2　半导体照明产品热设计流程图

(4) 产品应通过何种安全认证。

根据需求分析可以进行初步的热设计,设计者应该了解:

(1) 产品的一般热功耗与极端热功耗;

(2) 是否需要使用有源散热方案;

(3) 是否在极端情况下仍可保证产品正常的工作;

(4) 安规对产品表面最高温度的要求;

(5) 成本要求。

可行性分析是根据产品的总体设计要求和产品规格,包括总的热功耗、工作环境温度、海拔高度、安全认证要求,对初步方案进行综合分析,修改初步方案。可以借助计算公式、计算机仿真进行,也可与实施过的热设计方案进行对比检验,采用多种方法一起评估初步散热方案的可行性。

系统设计中,首先找出一个或数个主要的发热元件并确定它的散热方案,在此基础上提出应用系统整体的散热方案。系统级散热方案不关注热设计细节,主要依据包括:

(1) 系统的总热功耗;

(2) 每个组件的热功耗;

(3) 主要器件的热功耗;

(4) 系统尺寸要求;

(5) 由结构设计、电路和光学设计所决定的 LED 器件、驱动 IC 及其他主要元器件的位置与排布的拓扑结构;

(6) LED、驱动 IC 及主要元器件的热学性质和机械性质。

系统设计的输出应包括:

(1) 确定 LED 灯具系统是不是封闭系统,若不是,则要给出进风口和出风口的位置和尺寸;

(2) 灯具系统内外的气流分布;

(3) 若必须风冷,应给出风扇的数量、位置和尺寸;

(4) 对于 LED 的封装则应给出最小的散热面积;

(5) 给出主要发热源的传热方案。

在此阶段,为了获得更为有效、经济、合理的散热效果,热设计工程师可以与电路、结构、光学设计工程师沟通,对主要热源的布局进行调整。

详细设计(单元分解与设计、单元实验验证)是指为达到总体设计目标对高热功耗元

器件，如 LED 光源、驱动 IC 等制定的详细热解决方案，首先要了解：

（1）高热功耗器件和组件的数目、每个高热功耗器件和组件的实际热流量及它们在电路板中的位置；

（2）电路板的种类、各层的热性能与厚度、电互联要求的电路层过孔位置与数量及电路层图形；

（3）若为封闭式自然对流，则应了解散热器的种类、基本结构与尺寸要求；若为开放式自然对流或强制式对流，则需要知道出风口和进风口的初步位置、风扇的数量和位置；

（4）系统的散热层级间热界面材料的要求。

对其中影响较大的部分应事先做实验，获得实际数据，这些数据将改善热模型的精度。之后根据模拟结果对系统的布局、材料的优化、外观结构等进行修正，通过多次模拟最终获得最优化的热设计方案。

按照优化方案进行产品的研发并制出工程样品，对其进行全面的测试，称之为工程验证测试（engineering verifiction test，EVT），与热性能相关的测试包括：

（1）正常工作环境下 LED 光源与驱动 IC 的结温；

（2）系统内部电路板的热场分布图；

（3）系统外壳的热场分布图，特别注意的是人体容易接触到的部位的温度不应对人造成伤害或引起不舒适；

（4）对流气体的流量与流速、噪声等。

若没有达到设计目标或某些局部仍有瑕疵，则应返回详细设计阶段重新改进直至达到设计目标。

完成改进的样品在正式投产前、小批量试产后，还应进行产品验证测试（product verifiction test，PVT），PVT 是指在极端工作条件（极限工作温度和压强等）下对产品热性能的测试，测试内容同 EVT。此时，设计工程师只能进行一些微小瑕疵的纠正。PVT 也是生产商为产品通过第三方认证做的预测试。

产品投入市场前还应在第三方检测机构进行最终的认证测试，包括安全测试、市场相关标准测试等，注意不同地区有不同的安全标准，如出口美国的 LED 照明产品必须通过 UL（美国保险商试验所，Underwriter Laboratories Inc.，UL）认证、能源之星（Energy Star）认证和 FCC（美国联邦通信委员会，Federal Communications Commission，FCC）认证。UL 认证侧重于 LED 照明产品的安全性能测试认证，FCC 侧重于电磁兼容性能测试认证，而 Energy Star 认证则侧重于节能性能测试认证。

思考题

1. LED 与 IC 的异同各是什么？
2. 何为 LED 产业发展的“Haitz 定律”？有何意义？
3. 为何诺贝尔物理学奖评选委员会认为蓝色发光二极管已经“让我们所有人受益”？
4. LED 封装技术的发展大致可分为几个阶段？各阶段的主要特征是什么？
5. 为何 LED 特别适合于照明应用？
6. LED 失效的种类和主要原因是什么？
7. 何为热设计？热设计的流程是什么？
8. 为什么在现代电子系统和光电子系统中都十分重视热设计？

第2章 传热学基础

什么是热？培根从摩擦生热等现象中得出“热是一种膨胀的、被约束的而在其斗争中作用于物体的较小粒子之上的运动”，创立了“热的运动学说”。法国科学家和哲学家伽桑狄认为，运动着的原子是构成万物的最原始的、不可再分的世界要素，同样，热和冷也都是由特殊的“热原子”和“冷原子”引起的，创立了“热质说”。它可以简单地解释当时发现的大部分热学现象，在热质说观点的指导下，布莱克发现了“比热”和“潜热”，工程应用中也取得了一些成就。1798 年本杰明·汤普逊在慕尼黑监督炮筒钻孔工作时发现“小部分碎屑能够放出这么大的‘潜热’”，对热质说提出了质疑。1799 年英国化学家戴维利用实验彻底否定了“热质守恒”的关系，由此断言“热质是不存在的”，并于 1812 年明确提出：“热现象的直接原因是运动，它的转化定律和运动转化定律一样，同样是正确的。”

2.1 热与能量

热的实质是微观尺度上原子混乱运动的能量，包含运动动能和势能两部分。

(1) 对于理想气体，近似认为粒子只有动能，而无势能。但当粒子是分子时，还要考虑分子内原子间的相互作用造成的运动，如分子振动、转动；

(2) 对于理想固体，采用谐振子模型，同时包括动能的作用和储存势能的作用。极低温下，原子运动能量很小时，采用爱因斯坦、德拜的模型；

(3) 液体的热运动还未建立起理想的模型，液体是介于固体与气体中间的一个状态。

所以，热的概念实际上是一种微观粒子运动的宏观统计行为，即在宏观尺度上看待微观尺度原子的运动行为，也就是说热力学的压力、体积、温度、熵、焓等都是大量粒子宏观统计下的量。

我们把与原子和分子的动能和势能相关的能量称之为材料的微观能，主要包括：

(1) 平动动能：是指气体、液体以及金属中的原子均做自由运动

所具有的动能，随着温度的升高而增加。

(2) 转动动能：诸如水、二氧化碳等复杂分子围绕其质心旋转所具有的动能，随着温度的升高也增加。

(3) 振动动能：晶体中的原子或分子依靠它们的电子与其原子核的电场力结合为一体，该力大小反比于电子与原子核距离的平方，粒子间的碰撞将改变之间的间距，引起原子的振动，高温时尤为重要。

(4) 电子结合能：是一种与电子结合力相关的势能，如将晶体原子束缚在晶格位置，该能量在放热、吸热的化学反应中被释放或吸收。

(5) 原子核结合能：是一种与原子核结合力相关的势能，比电子结合能强得多，该能量在核裂变反应中被释放，在核聚变反应中被释放或吸收。

此外，还有诸如电子自旋、原子核自旋、外电场和外磁场作用在离子化分子或自由电子的势能等。称其上述各种微观能的总和为该系统的总内能 U，它仅与系统的温度、压力及质量相关，与其他量无关。系统的总能量则由该系统的总内能、宏观的动能和势能之和构成。

2.2 能量传递与传热

改变宏观物体的状态需要做功，所做的功与消耗的能量相等。因此，功把能量从做功系统转移到被做功系统，即功是两个系统之间能量传递或转化的途径，一般伴随着宏观可见状态的改变。

但是涉及热的做功并未伴随宏观可见状态的变化，例如放入微波炉中加热包子，能量的传递仅导致了包子温度的变化。称两个系统或物体由于温度差而发生能量的传递为热传递或传热，把所传递的能量称为热量，热量的国际计量单位为焦耳(J)。此外，常用的计量单位还包括卡(cal)，焦耳与卡的换算关系为 1cal=4.1868J。定义单位时间流过的热量为热流量，国际计量单位为瓦特(W)或卡/秒(cal/s)，用 Q 表示热流量。定义通过单位面积的热流量为热流密度，计量单位为 W/m^2 或 cal/m^2s，用 q 表示。

一个系统的状态可以通过许多参数描述，如质量、体积、压强、温度、内能、动能、势能、极化、磁化等，这些参数之间一般相互关联。例如，当已知某可压缩物质的温度 T 和密度 ρ 的时候，单位质量的内能 u 和压强 p 可以由下式确定：

$$u = U(T,\rho)/m = u(T,\rho) \quad 及 \quad p = p(T,\rho) \tag{2-1}$$

式中，U 为该物质的总内能；m 为该物质的质量。称这些方程为状态方程。

需要注意的是对于简单可压缩物质，并不是所有的两个参数都一直相互独立的，如水的沸点是压强的函数，仅当压强为 101.42kPa 时水的沸点为 100℃，而在沸点前水的温度和压强是相互独立的。

当有能量传递给物质时将会增加该物质的内能、提高其温度，称单位质量的物质温度升高 1℃所需要的热量为该物质的比热容，记为 c，国际单位为 J/(kg·K)。

在体积不变的条件下，单位质量的物质温度升高 1℃所需要的热量为该物质的定容比热容，记为 c_v，可表示为

$$c_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = \frac{1}{m}\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v \tag{2-2}$$

如在高压锅蒸饭过程中容积不变，此时水蒸气的比热容为定容比热容。

在压力保持不变的条件下，单位质量的物质温度升高1℃所需要的热量为该物质的定压比热容，记为c_p，可表示为

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p \tag{2-3}$$

如在敞开盖子的壶里烧水则在加温过程中水的压力一直不变，此时水的比热容为定压比热容。式中的h为比焓(enthalpy)，是热力学中表征物质系统能量的一个重要状态参量，表示单位质量的物质所含的全部热能，表达式为

$$h = u + p/\rho \tag{2-4}$$

一般情况下，气态物质的定压比热容大于定容比热容，即：$c_p > c_v$。主要原因是在定压条件下物质温度升高的同时体积会膨胀，即所传递的能量中只有部分能量用于内能的增加，另外一部分转化为机械能同时用于气体体积的膨胀。一般把固体和液体视为不可压缩的物质，因此，固体和液体的定压比热容与定容比热容相等。

对于常用气体，例如空气、氧气、氮气、氢气、一氧化碳、二氧化碳等，它们的压强p、温度T和体积v满足理想气体定律，即

$$pv = n\mathscr{R}T \tag{2-5}$$

式中，n为气体的量；$\mathscr{R}$为气体常数。$\mathscr{R}$由下式描述

$$\mathscr{R} = \frac{8314}{M} \tag{2-6}$$

式(2-5)、式(2-6)中，M为气体的摩尔质量，T为绝对温度；n与M、气体质量m的关系为

$$n = m/M \tag{2-7}$$

对于理想气体比热容间存在以下关系

$$c_p = c_v + R \tag{2-8}$$

理想气体单位质量的内能和焓仅仅是温度的函数，即式(2-2)、式(2-3)可表示为

$$\mathrm{d}u = c_v\mathrm{d}T \tag{2-9}$$

$$\mathrm{d}h = c_p\mathrm{d}T \tag{2-10}$$

注意c_p和c_v均是温度的函数，在温度变化不大的范围内可用它们的平均值求出单位质量的内能与焓。

2.3 基本定律

2.3.1 热力学第一定律

能量以做功或热的形式从一个系统传递至另外一个系统，这种能量的传递是一个系统获得或失去能量的唯一途径。热力学第一定律指出：能量不能凭空产生或消失，只能从一种形式转化为另外一种形式，或者从一个系统转移至另外一个系统。即进入系统的

能量 E_{in} 和离开系统的能量 E_{out} 的差值等于该系统终态总能量 E_f 和初态总能量 E_i 的差值：

$$E_{in} - E_{out} = E_f - E_i = \Delta E_{sys} \tag{2-11}$$

式中 ΔE_{sys} 为该系统能量的变化，等于终态总能量 E_f 和初态总能量 E_i 的差值。该方程也被称为能量平衡方程，是分析热量传递的基本方程。

当公式两面同时对时间 t 微分，得

$$Q_{in} - Q_{out} = \mathrm{d}E_{sys}/\mathrm{d}t \tag{2-12}$$

式中 Q_{in}、Q_{out} 分别为输入和输出系统的热流量。如果一个系统的能量值不随时间变化，则称该系统为稳态。此时，输入系统的总能量等于输出系统的总能量或流入系统的热流量等于流出系统的热流量。

有两类热工程系统：一类系统不允许任何质量的变化，即无质量变化的输入与输出；另外一类则允许质量的变化，即伴随着质量变化的输入与输出。

前者是一个封闭的系统，即固定质量或控制质量，例如一瓶矿泉水、气缸内的气体、一只电阻或白炽灯。把矿泉水放入冰箱后通过和周围空气的热交换使矿泉水变凉，给白炽灯通电后使之发光发热等。虽然质量不变，但是，热量还是可以流入或流出该封闭系统。后者并非一个封闭系统，称之为固定体积或控制体积，例如冷水进入热水器加热后热水流出，冷空气进入计算机冷却了系统内的 CPU 等电子元器件后转换成高温空气再流出计算机箱体。这两种形态的能量平衡方程是不同的。

2.3.2 质量固定的传热

由于系统的总能量是其内能、动能与势能之和，因此，系统总能量的改变与其内能、动能与势能改变相等，即：

$$\Delta E_{sys} = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p \tag{2-13}$$

式中，ΔU 为系统总内能的变化量；ΔE_k、ΔE_p 分别为系统动能和势能的变化量。该式的热流量表达式为

$$Q_{in} - Q_{out} = \mathrm{d}U/\mathrm{d}t + \mathrm{d}E_k/\mathrm{d}t + \mathrm{d}E_p/\mathrm{d}t \tag{2-14}$$

对于绝大多数系统而言，其宏观动能与势能的变化与其内能变化相比可以忽略不计，此时，公式(2-13)和(2-14)可简化为

$$\Delta E_{sys} = \Delta U \tag{2-15a}$$

$$Q_{in} - Q_{out} = \mathrm{d}U/\mathrm{d}t \tag{2-15b}$$

如果系统由理想气体或不可压缩的固体、液体组成，由公式(2-2)可得

$$\Delta E_{sys} = mc_v\Delta T \tag{2-16a}$$

$$Q_{in} - Q_{out} = mc_v \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}t} \tag{2-16b}$$

$$\Delta T = T_f - T_i \tag{2-16c}$$

式中 ΔT 是指系统终态与初态温度的温差，需要注意此时式中的 c_v 应为所讨论的系统温度范围内的定容比热容的平均值。

例题 2-1

把 10kg 水从室温 20℃加温至 100℃，试计算：

（1）其内能的变化。

（2）若将上述的水由静止状态加速至 100m/s，计算其动能的变化。

（3）将上述的水由地面提升至 1km，计算其势能的变化。

解 （1）由于水为不可压缩的工质，则它内能的变化与温度的变化相关，即

$$\Delta U = mc_v \Delta T$$

c_v 为 20℃至 100℃的水的定容比热容的平均值，可从本书附件分别查出 20℃和 100℃时的 c_v，则平均值 $c_{v,\text{ave}} \approx 4199\text{J/(kg·K)}$。

水的内能变化为

$$\Delta U = mc_v \Delta T \approx 3149250\text{J}$$

（2）动能的变化量为

$$\Delta E_\text{k} = \frac{1}{2}m(v_2^2 - v_1^2) = 5000\text{J}$$

（3）势能的变化量为

$$\Delta E_\text{p} = mgh = 98000\text{J}$$

由此题可见，即使速度从 0 变化至 100m/s，再将其从地面提升至 1km 的高度，其动能和势能的总变化仅为内能变化的 4.8%。因此，确实可以忽略宏观能量变化的影响。

可以证明在忽略宏观能量变化时，一个定容的控制质量系统中，传热是这个系统唯一的能量传递方式，其热量的传递值为

$$\Delta E = mc_v \Delta T \tag{2-17}$$

同样，也可以证明在定压条件下，单相工质的控制质量系统中的热量的传递值为

$$\Delta E = mc_\text{p} \Delta T \tag{2-18}$$

2.3.3 体积固定的传热

使用空气或其他不可压缩工质的快速流动带走发热体的热量是热管理中的一个常用手段，如图 2-1 为一体积固定、具有 3 个输入、3 个输出端口的散热系统示意图。单位时间输入至该系统的工质质量与单位时间从该系统输出的工质质量相等，称之为体积固定的能量平衡方程，表示为

$$\sum_{i=1}^{m} \frac{\text{d}m_{ii}}{\text{d}t} = \sum_{j=1}^{n} \frac{\text{d}m_{oj}}{\text{d}t} \tag{2-19a}$$

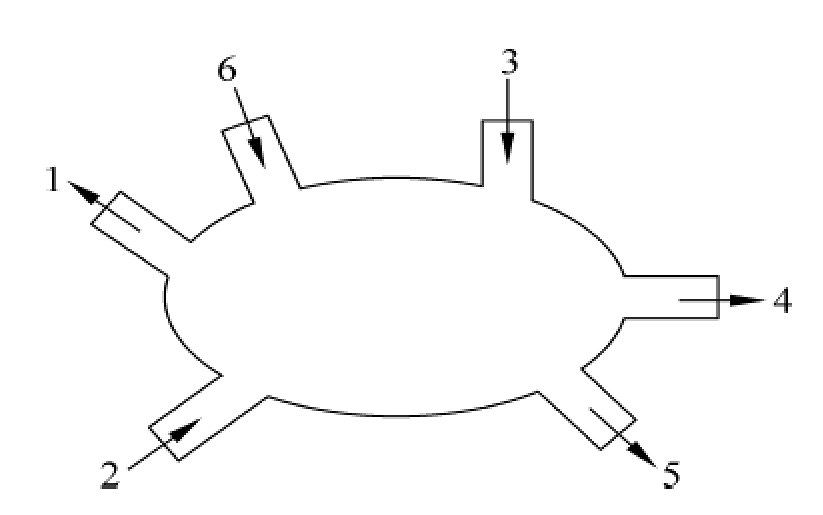


图 2-1 具有 3 个输入 3 个输出端口体积固定的散热系统示意图

式中，m_{ii} 表示第 i 个输入口的质量，m_{oj} 表示第 j 个输出口的质量。

设不可压缩工质从 n 个端口进入，带走体积为椭圆形区域内的热量后从 m 个端口输出，根据能量平衡方程可以推导出稳态下的热流量公式如下：

$$Q = \sum_{j=1}^{m} h_{oj} \frac{\text{d}m_{oj}}{\text{d}t} - \sum_{i=1}^{n} h_{ii} \frac{\text{d}m_{ii}}{\text{d}t} + \frac{\text{d}E_\text{c}}{\text{d}t} \tag{2-19b}$$

式中，h_{ii}、h_{oj}分别是第 i 个输入端口和第 j 个输出端口处的比焓；$\mathrm{d}m_{ii}$、$\mathrm{d}m_{oi}$分别是第 i 个输入端口和第 j 个输出端口处工质的质量变化；$\mathrm{d}E_c$ 为系统在 t 时刻的能量变化。需要注意的是该式是在系统工质没有功率输入和输出的条件下推导而得。

例题 2-2

图 2-2 所示为一机顶盒，空气从后端散热口进入，端口长 $l_i=300\text{mm}$。热空气从左右两个散热出口排出，左出口长 $l_{o1}=100\text{mm}$，右出口长 $l_{o2}=75\text{mm}$。端口高均为 $w_i=w_{o1}=w_{o2}=50\text{mm}$。安装有集成电路等电子元器件的电路板安装在盒体底部。外部环境温度为 25℃，允许出口的空气流速为 2m/s，盒体内最高温度为 55℃。

求：(1) 入口处所允许的最小空气质量流量与流速。

(2) 系统所允许的最大功耗。

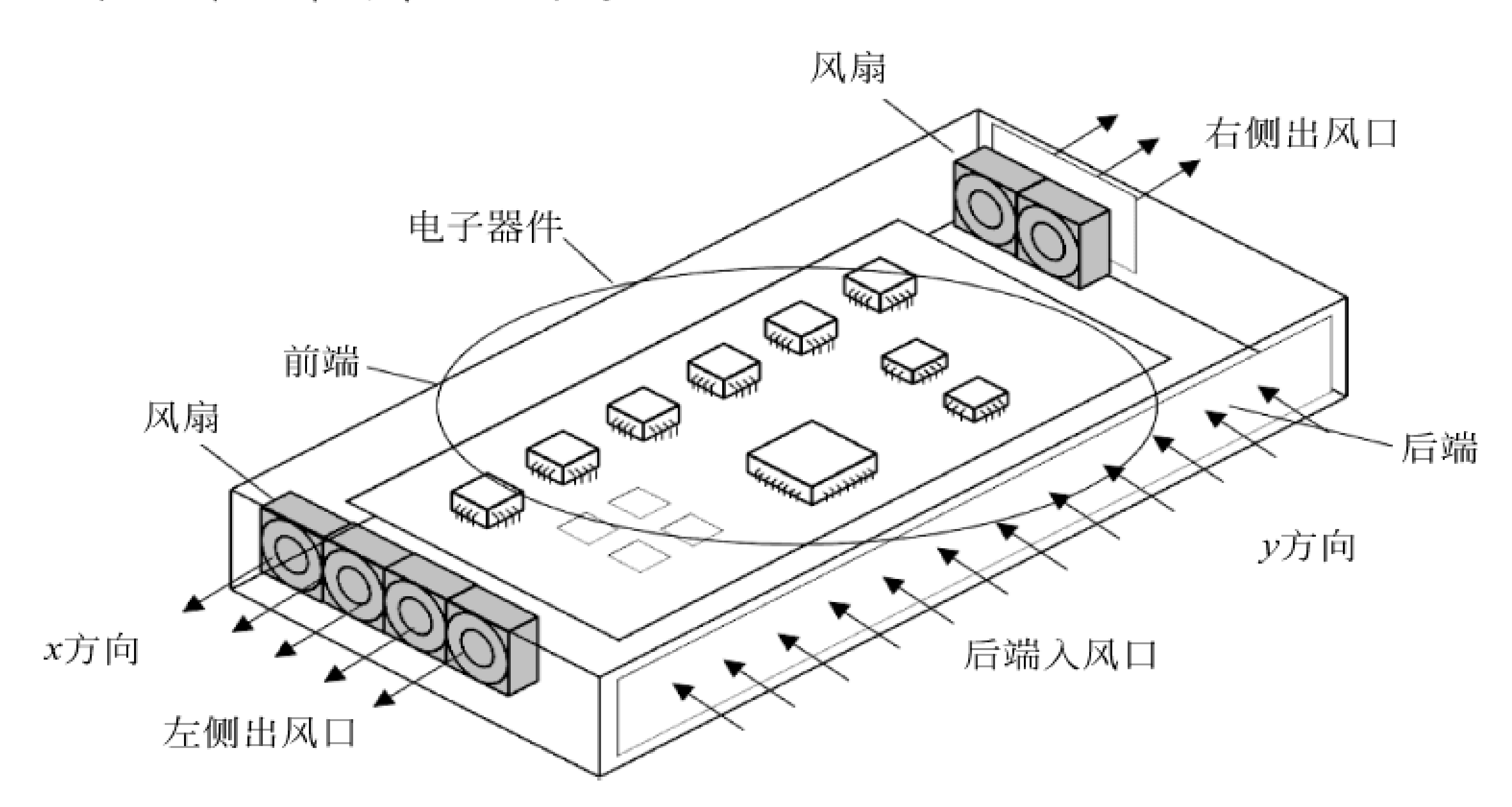


图 2-2 具有 1 个输入 2 个输出端口的机顶盒散热系统示意图

解 这是一个典型的体积固定的散热系统，其盒体内部的空气是体积确定的散热工质。假设该机顶盒工作在深圳(近似为 0 海拔，一个标准大气压约为 100kPa)，可从附录 C 中查得空气在工作温度范围内的定压比热容平均值 $c_{p,\text{ave}}=1008\text{J/(kg·K)}$。

(1) 根据体积固定的能量平衡方程，单位时间进、出该盒体的空气质量(质量流量)应相等，即

$$\frac{\mathrm{d}m_i}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}m_{\text{ol}}}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}m_{\text{or}}}{\mathrm{d}t}$$

再根据理想气体定律可得入口处最小质量流量为

$$\frac{\mathrm{d}m_i}{\mathrm{d}t}=\rho l_{\text{ol}}w_{\text{ol}}\left(\frac{\mathrm{d}x_{\text{ol}}}{\mathrm{d}t}\right)+\rho l_{\text{or}}w_{\text{or}}\left(\frac{\mathrm{d}x_{\text{or}}}{\mathrm{d}t}\right)=\frac{p}{RT}\left[l_{\text{ol}}w_{\text{ol}}\left(\frac{\mathrm{d}x_{\text{ol}}}{\mathrm{d}t}\right)+l_{\text{or}}w_{\text{or}}\left(\frac{\mathrm{d}x_{\text{or}}}{\mathrm{d}t}\right)\right]$$
$$=0.019\text{kg/s}$$

又由上式可得入口处的空气流速为

$$\nu_i=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=\frac{RT}{pl_i w_i}\frac{\mathrm{d}m_i}{\mathrm{d}t}=1.19\text{m/s}$$

(2) 本系统所允许的最大散热量由稳态下的能量平衡方程决定，由公式(2-19)可得

$$Q=h_{\text{o1}}\frac{\mathrm{d}m_{\text{o1}}}{\mathrm{d}t}+h_{\text{o2}}\frac{\mathrm{d}m_{\text{o2}}}{\mathrm{d}t}-h_i\frac{\mathrm{d}m_i}{\mathrm{d}t}$$

其中，h 可由公式(2-10)求得

$$Q \approx c_{p,\mathrm{ave}}\left[T_\mathrm{o}\left(\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{o}1}}{\mathrm{d}t}+\frac{\mathrm{d}m_{\mathrm{o}2}}{\mathrm{d}t}\right)-T_\mathrm{i}\frac{\mathrm{d}m_\mathrm{i}}{\mathrm{d}t}\right]=575\mathrm{W}$$

2.4 传热机理

热力学第二定律表明热量总是自发地从较高温区域流向较低温区域，温度最高的区域叫热源。称热量传递的过程为传热，基本方式包括热传导、热对流和热辐射。热传导也称为导热，是指热量在固态、液体、气体内部进行的热量传递，传热机理为物质原子内电子之间的动力学热能的传输，如介电材料的晶格振动、金属材料的自由电子能量转移过程，它们并未引起物质质点的可见运动，如 *LED* 器件加电工作，*LED* 芯片生成的热量传递到支架、散热器的过程。热对流是指由于两个温度不同的物质表面之间因相对流速不同而导致的热量传递，对流只能发生在流体中，传热机理是物质质点的移动与热传导共同作用的结果，实际应用中多为流体流经固体表面时两者之间发生热交换引起的热量传递，如散热器向流过其表面的空气进行的热量传递。热辐射是指高于绝对零度的物体通过电磁波辐射进行的热量传递，主要发生在 0.1～100μm 的红外频段，如 *LED* 加电工作后，热量传导至散热器，散热器再将热量辐射至周围环境空间。

称物体中某两个点的温度差为温差，所有点的温度分布为温度场。按温度场与时间和地点的关系划分为非稳态温度场和稳态温度场。非稳态温度场中温度随时间和地点均变化，变化趋于稳定后即达到了稳态分布。如 *LED* 加电工作的初始时间段其温度场为非稳态。稳态温度场中温度随时间和地点均无变化，如 *LED* 加电工作一段时间后其表面的温度分布达到稳定状态。达到稳态的时间与热源、材料热性能、环境状态等相关。称温度场中温度值相同点构成的线和面分别为等温线和等温面，其法线方向为该点的热量流动方向，简称热流方向。热流方向的温度变化为温度梯度。在计算机辅助热设计中，会将这些不同的等温面标以不同的颜色构成温度场的"云图"。

2.4.1 热传导

1. 一维热传导公式及材料热特性

图 2-3 是以导热平板为例的一维热传导分布示意图。傅里叶(*J. B. Fourier*)用实验证明在固态导热过程中，x 处的热流密度 q 与温度梯度成正比，即

$$q(x)=-\lambda\frac{\mathrm{d}T(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (2\text{-}20\mathrm{a})$$

用热流量可表示为

$$Q(x)=-\lambda A\frac{\mathrm{d}T(x)}{\mathrm{d}x} \qquad (2\text{-}20\mathrm{b})$$

图 2-3 平板一维热导分布示意图

式中，λ 为材料的热导率，也称为导热系数，单位为 $W/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{K})$；$A$ 为平板面积；负号表示

热流从高温流向低温。T_1、T_2 分别为平板二侧的温度。

不同材料具有不同的热导率，即使是同一材料，在不同温度时的热导率也略有不同，可用下式表示：

$$\lambda = \lambda_0(1+\alpha T) \quad (2\text{-}21)$$

式中，λ_0 为 T_0 温度（一般为室温）下的热导率；α 为材料热导率的温度系数。一般情况下，金属的温度系数为负值，除水以外的液体温度系数也为负值，而气体的温度系数为正值。表 2-1 为半导体光电子封装行业常用材料的热参数。

表 2-1　常用封装材料的热参数

类别	材料	密度/kg/m^3	比热容/J/(kg·K)	热导率/W/(m·K)	线膨胀系数/ppm/K	熔点/℃	电阻率/$10^{-8}\Omega\cdot m$
金属	纯铝	2707	896	204	25	660	2.7
	铜	8900	390	390	17	1083.4	1.7
	银	1049	235	418	19.7	962	1.5
	金	1932	128	297	14.2	1064	2.4
	钨	1930	160	200	4.5	3410	5.3
	钼	1022	276	146	5	2617	5.2
	钯	1202	245	70	11	1552	10.8
	镍	8902	471	92	13.3	1452	6.8
	铬	7200	461	91.3	6.3	1860	13.2
	可伐合金			17	5.9		
	钢			60	12	1515	
	金铂	1080	130	70		1773	11
	Au-20%Sn			57.3	16	280	
	Pb-5%Sn			63	29	275	
	Cu-20%W			248	7		
	Cu-20%Mo			197	7.2		
	硅	2328	700	150	2.5	1420	10^9
陶瓷及玻璃	氧化铝-92%	3700		16.7	7.1		$>10^{20}$
	氧化铝-96%	3700		20.9	7.3		$>10^{20}$
	氧化铝-99%	3000		<16.7	7.7		$>10^{20}$
	氮化硅	3400			3.2	1900	
	碳化硅	3216		500	4.7	2540	1.5×10^8
	氮化铝	3210		25	4.5	2900	
	氮化硼	1900			2.7	2980	
	氧化铍	3025		210	9.0	2550	
	硼硅玻璃				3.2		
	二氧化硅	2260～2320	752			1703～1713	$>10^{14}$
	CVD 金刚石	3515		2000	1.1	4000	10^{19}
	聚酰亚胺	1420			2.2～4.7	>500	$10^{22}\sim10^{24}$
	聚四氟乙烯	2140～2240			95	327～342	$10^{22}\sim10^{25}$

2. 多维稳态温度场

对于二、三维温度场分布的求解是复杂的数学问题，可以采用数学解析法、有限差分法、热源温度场叠加法等方法解决。数学解析法是采用导热微分方程求解热传导温度场分布的一种方法，导热微分方程是能量守恒定律的一种数学表达式。与 LED 封装热分析相关的导热微分方程可用公式(2-22)泊松(Poisson)方程来求解，泊松方程是常物性、稳态、三维且有内热源问题的温度场控制方程式。直角坐标系下的表达式见公式(2-22)。

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\frac{\dot{\Phi}}{\lambda}=0 \tag{2-22}$$

式中，T 为温度；x、y、z 为位置坐标，$\dot{\Phi}$ 为单位时间、单位体积内热源的生成热；λ 为材料的热导率，与热扩散率 χ、材料密度 ρ、材料的比热容 c 相关。它们之间的关系由公式(2-23)表示。

$$\chi=\frac{\lambda}{c\rho} \tag{2-23}$$

一般情况下，比热容为温度的函数，但在温度变化范围不太大时，可近似地作为常量。按照定义，物质存储的热流量 Q 为

$$Q=cm(T_2-T_1)=cm\Delta T \tag{2-24}$$

式中，m 为物质的质量；T_1、T_2 分别是物质初态和末态的温度；ΔT 为温度的变化。当 $\Delta T>0$ 时，表示物质吸热；当 $\Delta T<0$ 时，表示物质放热。比热容对瞬态热性能影响巨大。

求解公式(2-22)时，需要附加边界条件(瞬态的分析还需要初始条件)使每一节点的热平衡方程具有唯一解：

(1) 若已知物体边界上的温度函数，用公式(2-25)表示为

$$T|_\Gamma=T_0;\ T|_\Gamma=f(x,y,z,t) \tag{2-25}$$

式中，Γ 为物体边界；T_0为已知温度；$f(x,y,z,t)$为已知温度函数。

(2) 若已知物体边界上的热流密度，用公式(2-26)表示为

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_\Gamma=q;\quad -\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_\Gamma=g(x,y,z,t) \tag{2-26}$$

式中，q 为热流密度；$g(x,y,z,t)$为热流密度函数。

(3) 若与物体相接触的流体介质的温度和对流系数已知，用公式(2-27)表示为

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_\Gamma=\alpha'(T-T_f)|_\Gamma \tag{2-27}$$

式中，T_f 为流体介质温度；α'为对流系数。

在稳态条件下，系统内各节点温度都不随时间变化，能量平衡方程为

$$Q_{\text{input}}+Q_{\text{generate}}-Q_{\text{output}}=0 \tag{2-28a}$$

$$[K]\{T\}=\{Q\} \tag{2-28b}$$

式中$[K]$为传导矩阵，包括热导系数、对流系数、辐射率和形状系数；$\{T\}$为节点温度向量；$\{Q\}$为节点热流率向量，包括生成热。

在瞬态过程中，系统温度、热流率、边界条件等随时间变化，瞬态平衡以矩阵形式表示为公式(2-29)

$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = \{Q\} \tag{2-29}$$

其中，$[C]$为比热矩阵；$\{\dot{T}\}$为温度对时间的导数。瞬态分析可用于对器件的热冲击或者温度循环进行研究。

使用公式(2-22)求解热场分布的过程如下：

(1) 建立并简化导热部件的结构模型。

(2) 确定边界条件，根据实际情况简化导热部件表面的传热状态，如散热条件很差时可以视作隔热表面；反之，若传导给边界的热量与散热近乎平衡，界面的温度变化缓慢时，可以视为恒温表面；其他情况视为热对流表面。

(3) 建立热源模型，例如，按照几何尺寸分为点热源、线热源、面热源；按照发热时间分为瞬时发热热源、持续发热热源、断续发热热源；按照位置变化分为固定热源、运动热源等。

(4) 按照导热部件的结构模型建立导热微分方程。

(5) 确定初始值和边界条件。

(6) 求解微分方程。

由于求解过程十分复杂，为方便求解对模型做了许多假设，导致求解结果误差较大，即便如此也仅有少量的问题有解析解。

例题 2-3

求解图 2-4 中的 COB 型封装结构 LED 器件的热阻，LED 芯片为硅衬底，电路层为铜，各层材料的主要参数见表 2-2，陶瓷基板与空气交界附近的等效热对流系数 $\alpha' = 15\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$，陶瓷基板热导率 $\lambda = 20\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$。

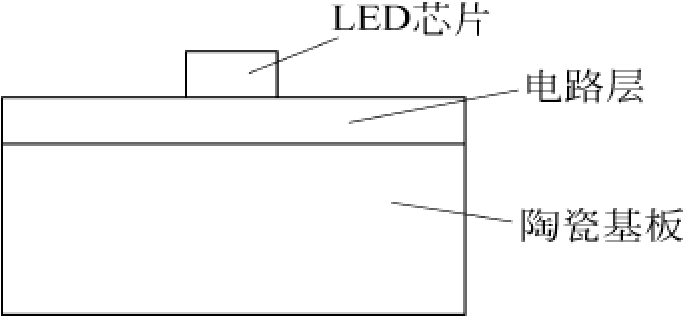


图 2-4 COB 型封装结构 LED 器件

表 2-2 各层材料的主要参数

	模型参数			
	长/mm	宽/mm	厚/mm	热导率/W/(m·K)
LED 芯片	1	1	0.16	150
铜线路层	5	5	0.2	398
陶瓷基板层	18	18	1	20

解

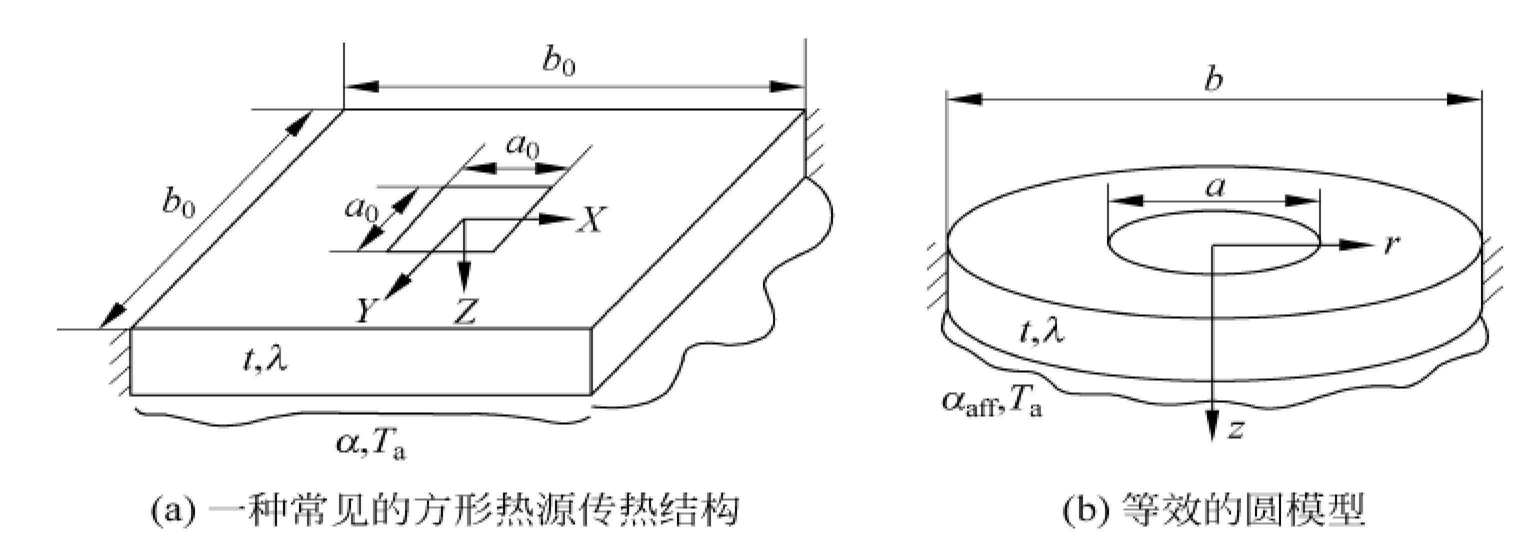
(1) 利用公式(2-20b)从上述参数可以求解出各层的体热阻分别为：1.067K/W、0.020K/W、0.154K/W，总的体热阻为各层热阻之和，则 $R_{\text{thz}} = 1.24\text{K/W}$。

(2) 芯片尺寸远小于铜线路层和陶瓷基板层，横向散热的热阻分量——扩展热阻 R_{sp} 不可忽略。热流稳态后，LED 芯片横向扩展传导的热场近似为圆形对称分布，将直角坐标系映射为柱坐标系可将三维热传导问题简化为二维，可简化微分方程(2-22)的求解。映射前后的模型如图 2-5 所示，参数之间的关系如公式(2-30)和(2-31)所示：

$$a = \sqrt{A_s/\pi} \tag{2-30}$$

$$b = \sqrt{A_p/\pi} \tag{2-31}$$

式中 A_s、A_p 分别为热源和热沉的面积。



(a) 一种常见的方形热源传热结构　　(b) 等效的圆模型

图 2-5　一种常见的方形热源传热结构及其等效的圆模型

公式(2-22)在柱坐标下为

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0 \tag{2-32}$$

边界条件为

$$r=0,\quad \frac{\partial T}{\partial r}=0 \tag{2-32a}$$

$$r=b,\quad \frac{\partial T}{\partial z}=\alpha T \tag{2-32b}$$

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial z}=\begin{cases} q & 0<r<a \\ 0 & a<r<b \end{cases} \tag{2-32c}$$

式中,α 为热对流系数;λ 为材料的热导率。

解此方程即可得到横向扩展热阻 R_{sp},见公式(2-33):

$$R_{sp}=\frac{\psi_{max}}{k*b\sqrt{\pi}} \tag{2-33}$$

式中,

$$\psi_{max}=\frac{1}{\sqrt{\pi}}(1-\varepsilon)\phi_c \tag{2-34}$$

$$\phi_c=\frac{\tanh(\tau\lambda_c)+\lambda_c/B_i}{1+(\lambda_c/B_i)\tanh(\tau\lambda_c)} \tag{2-35}$$

式中,

$$\lambda_c=\pi+\frac{1}{\sqrt{\pi}\varepsilon} \tag{2-35a}$$

$$\lambda\sqrt{A_s}R_m=\frac{\varepsilon\tau}{\sqrt{\pi}} \tag{2-35b}$$

$$\lambda\sqrt{A_s}R_f=\frac{\varepsilon}{\sqrt{\pi}_{B_i}} \tag{2-35c}$$

由公式(2-30)至式(2-35)可得芯片粘结层在铜线路层的扩展热阻 $R_{sp\text{-}chip}=1.632$K/W,铜线路层在陶瓷基板的扩展热阻 $R_{sp\text{-}Cu}=4.24$K/W,总的扩展热阻 $R_{sp}=5.87$K/W。该陶瓷 COB 封装的 LED 器件的总热阻为体热阻与扩展热阻之和,为 $R_{tot}=7.11$K/W。

讨论

(1) 在芯片尺寸远小于热沉尺寸时,扩展热阻不可忽略;

(2) 芯片与热沉横向尺寸之比越小、热导率越小,扩展热阻越大;

(3) 一般情况下扩展热阻对器件总热阻的影响不可忽略。

目前,业者已经研究开发出了多种专门的热仿真分析软件,可以仿真各种条件下三维物体的热场分布等热问题,许多甚至已经商业化,如 Ansys、Flo-EFD 等。由于采用了图形输入模式,使用起来更加便利,详细内容见本书下部。

2.4.2 热对流

1. 热对流基本定律

对流(convection)是将热源发出的热量经散热器导入空气并经空气的流动完成热量传递,从而维持热源温度的恒定。对流传热的热流密度遵循对流传热方程,即牛顿冷却定律,见式(2-36),它是研究热对流的基本公式。

$$Q = \alpha A(T_W - T_L) \tag{2-36}$$

式中,α 为对流系数,单位为 W/(m²·K);A 为散热器表面积,单位为 m²;T_W 和 T_L 分别为散热器表面、流体的主体温度,单位为 K。由公式可见,通过对流散热的热流是从高温区域传递到低温区域,通过流体介质的流动将热量传递,其本质是分子运动完成了热量的传递。

由此可见,要提高对流散热的能力需要增加发生热对流的散热器壁面面积,同时,也需要有大的对流系数。需要注意的是热传导中的热导率仅仅由物质的固有属性决定,而对流系数不仅取决于物质的固有性质,更与流体物质的流速、温差、重力加速度、流动区域形貌等条件相关。

2. 影响热对流因素

热对流散热的流体可以是气体,也可以是液体,最常见的有空气、水等。影响对流系数大小的主要因素有:

(1) 与流体的种类有关,一般液体的对流系数大于气体的;

(2) 与流体的物理性质如密度、粘度、导热系数、比热容相关,一般密度高、粘度低、导热系数高、比热容大的流体对流系数更佳;

(3) 与流体的相态性质相关,在热流传递过程中发生相变时流体的对流系数比没有发生相变的更高;

(4) 与流体的对流性质相关,强制对流比自然对流的对流系数更高。所谓强制对流是指采用额外的能量人为产生或加强流体的流动状态,如风扇转动使空气流动。自然对流是指流体自身性质产生自然的流动状态,如燃气灶加热火焰附近的空气使之向上流动,同时,不断有冷空气补充,产生空气流动;

(5) 与流体的运动性质相关,湍流状态的对流系数高于平流状态,散热器壁面的不平整、相邻散热翼片温度的差异等因素均导致平流态转化成为湍流状态;

(6) 与散热器的性质相关，如散热壁面的形状、位置、大小等均可影响对流系数。

3. 自然对流与强制对流

按照有无外部能量驱使流体的流动，对流分为自然对流和强制对流。

(1) 自然对流

自然对流是指由温差引起液相或气相物质密度变化而产生的物质自然流动，从而将流经物体的热量输运至外部环境的一种散热现象。

(2) 强制对流

强制对流是指在外力干预下强迫液体或气体按照要求的方向、速度流经物体表面，并将流经物体的热量输运至外部环境的一种散热现象。

一般液态物质的对流系数是气态物质对流系数的百倍左右，而产生相变的液态物质的对流系数又是其未发生相变对流系数的数千甚至数万倍，人们按照此原理制造了热管等新型的高效散热器件。表 2-3 为常见状态的对流系数。

表 2-3 常见条件下典型的对流系数

对流传热的类型	对流系数范围/W/(m^2·K)
空气自然对流	3～10
气体强制对流	20～100
水自然对流	200～1000
水强制对流	1000～15 000
水蒸气的滴状冷凝	46 000～140 000

由上述讨论可知，若要使对流达到有效的散热可以采用如下方法：

(1) 增加有效对流面积；

(2) 设计增强对流的散热器结构；

(3) 选择热导率高的流体并保障足够的量；

(4) 选择强制对流；

(5) 选择物质相变方式散热。

如前所述，公式(2-36)中的对流系数 α 远比公式(2-20)中的热导率 λ 复杂，对流系数不仅与材料的性质相关，还与流体的流速、流体和固体表面的几何形状相关。所以，如表 2-3 所示对流系数差异极大，对对流散热进行严格的数学处理很困难。

由于 LED 及应用产品的热流密度远低于半导体激光器(laser diade，LD)、CPU 集成电路等器件与系统，而且，LED 对成本更为敏感，因此，与 LED 相关的散热器设计通常使用空气作为散热载体，多采用自然对流散热，而 LED 显示屏等封闭性应用产品则一般采用风扇强制对流散热。

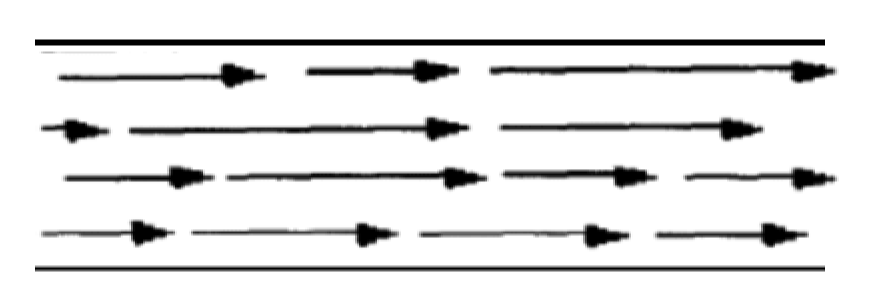
LED 光源或灯具的散热设计中首先要充分利用可以增强自然对流能力的散热结构，从而起到事半功倍的效果，如图 2-6 所示的一种 LED 灯具的散热结构就可达到这样的效果。将 LED 光源紧密安装在该散热器的底端，LED 产生的热量加热了散热器底部附近的空气，热空气通过散热器由下至上的通道向上传输，冷空气不断的补充至散热器底部附近。由下至上的通道强化了这种热对流现象，形成“烟道效应”，大幅提高了散热器的

散热能力。

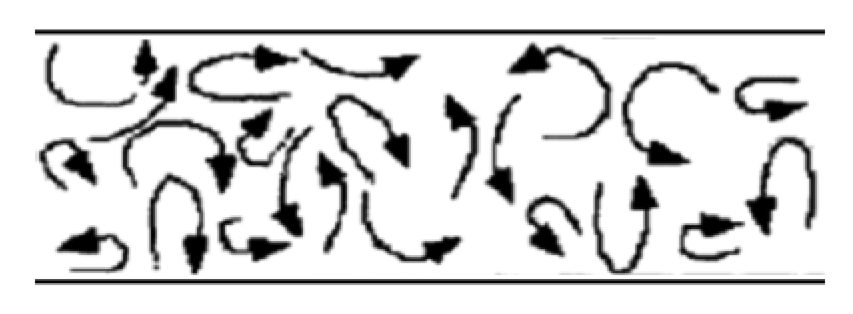
如前所述，对流换热是个复杂的过程，对流按照流动性质的不同又可以分为层流和湍流，如图 2-7 所示。湍流是指当流速达到一定的临界值后，流体质点出现明显的不规则掺混流动现象。层流是在流体流速较低时，相邻的流层分子之间互相扩散，不存在质点的掺混，呈现一种较有规则的流动。流体失去稳定性会导致层流过渡到湍流，一般以雷诺数（Re）的大小作为判定层流和湍流的依据。



图 2-6　太阳花散热器



(a) 层流示意图



(b) 湍流示意图

图 2-7　层流和湍流示意图

对流层流与对流湍流条件下的对流散热系数大不相同，但又是散热系统中必不可少的一个环节。本书仅列出几种简单但常见场景空气对流散热系数的简化公式，如下：

1）强制对流层流

当速度为 ν_a 的空气层流流过长度为 L 的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 3.9\sqrt{\nu_a/l} \tag{2-37}$$

2）强制对流湍流

当速度为 V_a 的空气湍流流过长度为 L 的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 5.5\sqrt[5]{\nu_a^4/l} \tag{2-38}$$

3）竖直平板的自然对流层流

温度为 T_a 的空气自然层流流经竖直放置的长度为 l、表面温度为 T_s 的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 1.4\sqrt[4]{\frac{T_s - T_a}{l}} \tag{2-39}$$

4）竖直平板的自然对流湍流

温度为 T_a 的空气自然湍流流经竖直放置的长度为 l、表面温度为 T_s 的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 1.1\sqrt[3]{T_s - T_a} \tag{2-40}$$

需要注意的是此种情况下对流系数与平板长度无关。

5）水平平板顶部自然对流

温度为 T_a 的空气自然层流流经水平放置的顶部面积为 A、周长为 l、表面温度为 T_s

的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 1.3\sqrt[4]{\frac{T_s - T_a}{A/L}} \tag{2-41}$$

6）水平平板底部自然对流

温度为 T_a 的空气自然层流流经水平放置的底部面积为 A、周长为 L、表面温度为 T_s 的恒温平板时，对流换热系数为

$$\alpha = 0.65\sqrt[4]{\frac{T_s - T_a}{A/L}} \tag{2-42}$$

2.4.3 热辐射

处于绝对零度以上的物质均会辐射电磁波，称此现象为热辐射。温度愈高，辐射出的总能量就愈大，短波成分也愈多。热辐射的光谱是连续谱，波长覆盖电磁波的全频段，波长较长的红外光是热辐射的主体。由于电磁波的传播无需任何介质，所以，热辐射是在真空中唯一的传热方式。物体在向外辐射的同时，还吸收从其他物体辐射来的能量。物体辐射或吸收的能量与它的温度、表面积、黑度等因素有关。黑体是研究热辐射的一个理想物体，指入射的电磁波全部被吸收，既没有反射，也没有透射。按照能量守恒定律，它也要同时向外辐射相等能量的电磁波。黑体辐射满足普朗克公式(Planck's radiation formula)，即单位面积、黑体在单位时间及单位频率间隔内，向单位立体角空间辐射出的能量(能量频谱密度)为

$$\rho_f = \frac{8\pi h f^3}{c^3}\frac{1}{\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1} \tag{2-43}$$

式中，普朗克常数 $h = 6.626\,196 \times 10^{-34}\,\mathrm{J \cdot s}$；波尔兹曼常数 $k = 1.380\,650\,5 \times 10^{-23}\,\mathrm{J/K}$；$f$ 为辐射电磁波的频率。图 2-8 为黑体的辐射光谱图。如果对公式(2-43)的所有频率、全部辐射方向积分，可得到绝对温度为 T 的黑体在单位面积、单位时间内向空间各方向辐射出的总能量，即辐射的热流量 Q，见公式(2-44)，称该公式为斯特番-波尔兹曼定律(Stefan-Boltzmann law)。

$$Q = \sigma A_s T^4 \tag{2-44}$$

式中，σ 为黑体辐射常数，也叫斯特番-波尔兹曼常数，$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\,\mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$；$T$ 为黑体表面的绝对温度；A_s 为黑体的表面积。该定律表明辐射热量正比于温度的四次方。

自然界的太阳可以近似为黑体，一般情况下，物体处于黑体与白体之间。引入发射率 ε 表示实际物体与黑体之间的差异，见公式(2-45)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_b} \tag{2-45}$$

发射率和物体的表面性质有关，其值介于 0～1 之间。发射率等于 0 的物体为白体，等于 1 为黑体。常见物质的发射率见表 2-4。非理想物体(即非黑体)表面的发射热量为

$$Q = \varepsilon\sigma A_s T^4 \tag{2-46}$$

此式中的 A_s 代表辐射物体的表面积。

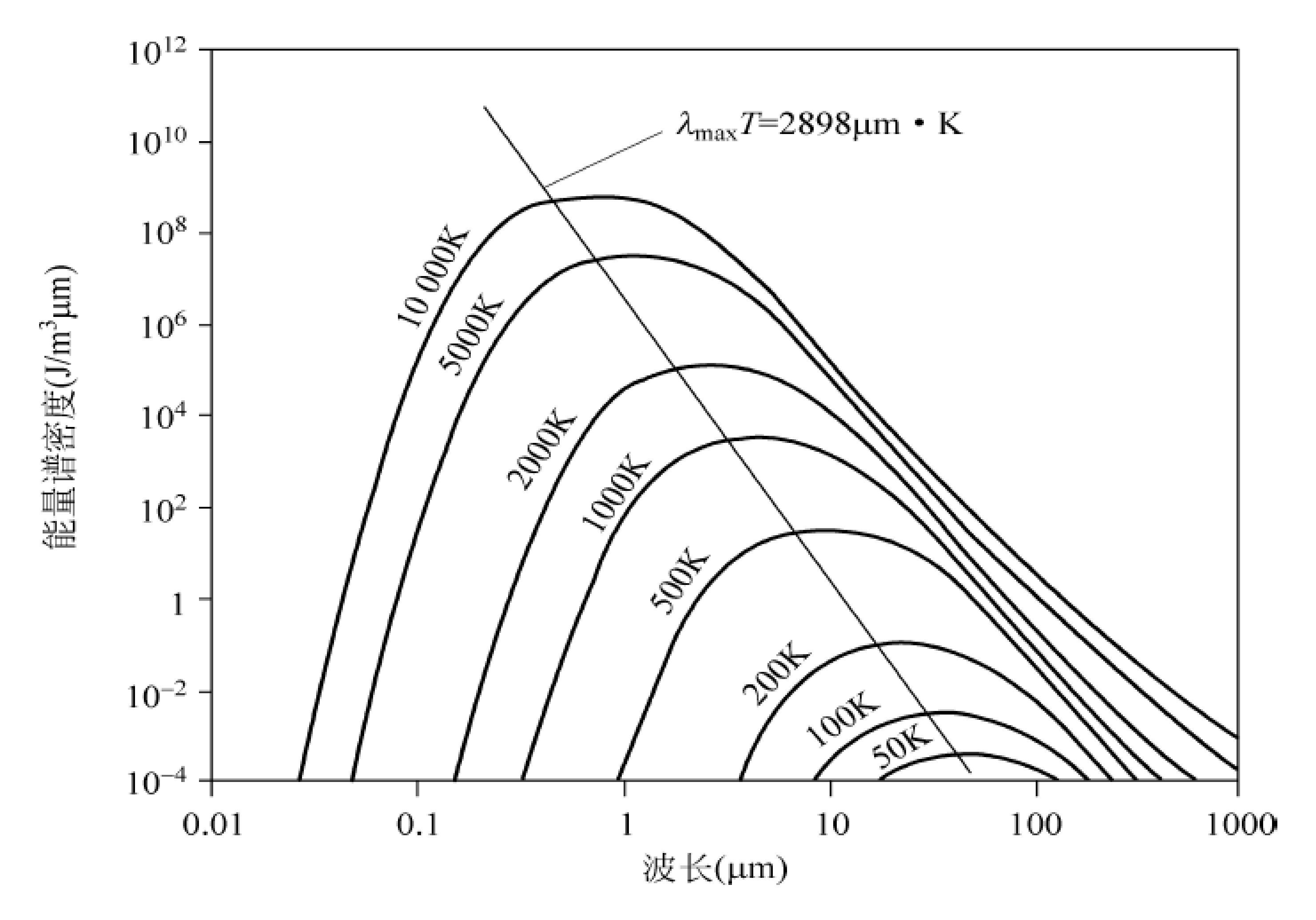


图 2-8　黑体辐射光谱图

表 2-4　常见物体的发射率

物　　体	温度范围/℃	发　射　率
市售铝板	373	0.09
抛光铝板	373	0.03
严重氧化铝板	367～778	0.2～0.31
阳极氧化铝板	27	0.86
抛光铜板	373	0.052
抛光熟铁	311～522	0.28
粗糙氧化钢板	311～644	0.94～0.97
301 抛光不锈钢	297	0.16
金属表面薄碳	294	0.927
光滑橡胶板	297	0.94
亚光黑漆	311～367	0.96～0.98
白漆		0.93

实际应用中的热辐射多为高温小体积物体向全空间(低温大体积物体)的热辐射,设高温小体积物体的发射率、表面积、表面温度分别为 ε_1、A_{S1}、T_{S1},低温大体积物体的平均温度为 T_{S2},此时的辐射散热量为:

$$Q=\varepsilon_1\sigma A_{S1}(T_{S1}^4-T_{S2}^4)=A_{S1}h_{rad}(T_{S1}-T_{S2}) \tag{2-47}$$

$$h_{rad}=\varepsilon_1\sigma A_{S1}(T_{S1}^2+T_{S2}^2)(T_{S1}+T_{S2}) \tag{2-48}$$

式中 h_{rad} 为辐射传热系数,不仅与物质表面反射率、辐射面积相关,还与物质表面及物质周围的环境温度相关。

例题 2-4

一热源位于铝材散热器上,散热器主体温度为 100℃,环境温度为 20℃,当给散热器

表面进行阳极氧化处理后，散热器主体温度变为多少？

答：查表 2-4 可知，未处理铝的发射率 $\varepsilon_1=0.09$，阳极氧化处理后提高至 $\varepsilon_2=0.86$。由公式(2-47)可得：

$$Q=\varepsilon_1\sigma A_{S1}(T_{S1}^4-T_{S2}^4)=\varepsilon_2\sigma A_{S1}(T'^4_{S1}-T'^4_{S2})$$

$$T'_{S1}\approx 70.4℃$$

由此可知，经过阳极氧化处理后，该散热器的散热能力大幅提升，散热器的主体温度由处理前的 100℃降为 70.4℃。

热辐射技术已经在冶金、陶瓷烧结等高温耗能领域得到广泛应用，取得了很好的节能效果。在室温附近的红外保暖布料在服装领域也已经开始推广应用。若将此技术用于 LED 照明光源与灯具的散热，由于其散热面积有限，故对材料表面的发射率值要求很高，一般要对散热器表面进行黑化处理，使其达到 0.8(室温至 100℃范围)以上方可有较为明显的散热效果。

2.5 热阻网络热设计

2.5.1 热阻的概念

1. 平板传导热阻

与欧姆定律定义电路中的电阻类似，可以定义热阻。设均匀热流量 Q 从截面积为 A、厚度为 d、热导率为 λ 的均匀介质平板上方均匀流入，上表面的温度为 T_1，下表面的温度为 T_2，如图 2-9 所示，利用公式(2-20b)积分可得

$$Q=\lambda A\frac{T_2-T_1}{d}=\lambda A\frac{\Delta T}{d}=\frac{\Delta T}{R_{cd}} \tag{2-49}$$

$$R_{cd}=\frac{d}{\lambda A} \tag{2-50}$$

图 2-9 均匀平板的传热示意图

定义 R_{cd} 为传导热阻，单位为 K/W 或℃/W，二者数值相等。传导热阻用于描述在热流传递过程中某材料或系统对热流传递的阻碍力。由此式可知，热流待通过的材料越厚、热导率越低、材料面积越小，则热阻越大。

例题 2-5

半导体芯片安装在一纯铜质热沉上表面，热沉长 l 和宽 w 均为 20mm，厚 d 为 1mm，芯片面积与热沉相同，发热功率为 30W。计算热沉的导热热阻及热沉两侧的温度差。

解 从表 2-1 得知纯铜的热导系数为 390W/(m·K)，可求出其热阻

$$R_{cd}=\frac{d}{\lambda A}=0.0064\text{K/W}$$

再求出热沉两侧的温差，为

$$\Delta T=QR_{cd}=0.19\text{K}$$

2. 对流换热热阻

同理,也可以定义对流换热的热阻,简称为对流热阻。由公式(2-36)可推导出对流热阻

$$R_{\mathrm{conv}} = \frac{(T_w - T_L)}{Q} = \frac{1}{\alpha A} \tag{2-51}$$

由此式可见,降低热对流过程的热阻需要增加发生热对流的散热器壁面面积,同时,也需要有大的热对流系数。

3. 辐射换热热阻

按照热阻定义由公式(2-47)和(2-48)同样也可以推导出辐射热阻

$$R_{\mathrm{rad}} = (T_{\mathrm{S1}} - T_{\mathrm{S2}})/Q = 1/A_{\mathrm{S1}}h_{\mathrm{rad}} \tag{2-52}$$

由此式可知,若要使物体具有有效的热辐射能力,即较低的辐射热阻必须选择高发射率物质及大的辐射表面。

例题 2-6

用一风扇侧向吹向例题 2-5 的热沉,在其上部产生 2m/s 的稳定对流风,环境温度为 20℃,求热沉和空气间的对流热阻及热沉表面的温度。

解 本题属于强制对流,对流换热系数可由空气强制对流层流公式计算,可得

$$\alpha = 3.9\sqrt{\nu_{\mathrm{a}}/l} = 39\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

对流热阻为

$$R_{\mathrm{conv}} = \frac{1}{\alpha A} = 64\mathrm{K/W}$$

热沉表面温度为

$$T_W = T\alpha + R_{\mathrm{conv}}Q = 1940℃$$

热沉表面的温度已经超过了纯铜的熔点,说明这种简单的散热系统设计不合理,需要采取其他散热手段将此温度降低到可以接受的程度。

例题 2-7

在前述纯铜热沉背面涂覆发射率为 0.9 的红外涂层,在不考虑对流影响时,求解辐射热阻。

解 这属于小体积的热沉向整个空间辐射热量的情况,首先由公式(2-47)求出热辐射作用下热沉背面的温度 T_{S1} 为 $T_{\mathrm{S1}} = 1135\mathrm{K}$。

由公式(2-48)可得辐射传热系数为

$$h_{\mathrm{rad}} = 89\mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$$

最后求得辐射热阻

$$R_{\mathrm{rad}} = \frac{1}{A_{\mathrm{S1}}h_{\mathrm{rad}}} = 29\mathrm{K/W}$$

此种情况下,辐射热阻远远低于对流热阻的原因在于热沉的温度很高,过高的热沉温度将导致半导体芯片的烧损。因此,实际的散热设计中要在热沉背面连接散热能力更强的散热器方可保证半导体芯片的结温维持在 120℃ 以内。

2.5.2 扩散热阻

由公式(2-20b)推导出的传导热阻在一维传热的情况下适用,即传热方向的尺寸小于其他两个方向的横向尺寸,且热源、热传导材料、散热器的横向尺寸相同。实际应用中的大多数情况是热量从较小尺寸的热源传递至较大尺寸的散热器,例如,LED 芯片封装在远大于其尺寸的基板、管壳上,再将基板、管壳安装在更大尺寸的散热器上,热量从芯片传导至热沉,再传导至散热器,最后由散热器将热量传递至空气中。在此种情况下,从芯片发出的热流量不仅沿芯片→热沉→散热器方向(垂直方向)传递,芯片的热流量还将在热沉表面方向(横向)传递,热沉的热流量也将在散热器表面方向(横向)传递,即此时的热流量传递是三维的,不再是一维的,使用一维近似将产生重大的误差。为了消除这种误差引入扩散热阻的概念,所谓扩散热阻实际上就是实际热阻的横向分量,也是一个一维参量。计算一半径 a 的热源直接安装在半径为 b、厚度为 d、热导率为 λ 的圆盘形散热器上,如图 2-10 所示。在不考虑接触热阻的理想状态下,而且,仅考虑在散热器的下表面发生热对流换热,其他部位(斜线阴影部分)为隔热状态。此时,通过求解三维拉普拉斯方程可以得到散热器的总体热阻,其结果是个无穷级数。在此,基于扩散热阻的模型,可以近似认为该系统的总热阻是其主传热方向(z 方向)的一维导热热阻(体热阻)R_{cond}、横向辅传热方向(r 方向)的扩散热阻 R_{sp}、对流换热热阻 R_{conv}之和,如下公式所示

$$R_{tot} = R_{cond} + R_{sp} + R_{conv} = \frac{d}{\lambda \pi r b^2} + R_{sp} + \frac{1}{\alpha \pi b r^2} \tag{2-53}$$

式中 α 为散热器外空气的对流系数。Lee 等给出了扩散热阻的近似解析表达式:

$$R_{sp} = \frac{(1-\varepsilon)\phi}{\lambda \pi a} \tag{2-54}$$

式中

$$\phi = \frac{\tanh(\lambda\tau) + \dfrac{\lambda}{B_i}}{1 + \dfrac{\lambda}{B_i}\tanh(\lambda\tau)},\quad \lambda = \pi + \frac{1}{\varepsilon\sqrt{\pi}},\quad B_i = \frac{hr_2}{k},\quad \tau = \frac{d}{r_2},\quad \varepsilon = \frac{r_1}{r_2}$$

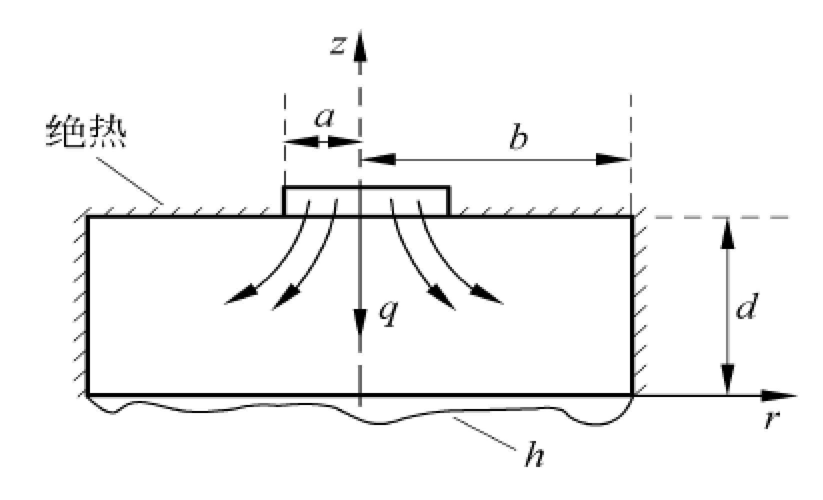


图 2-10 圆盘形热源安装在圆盘形散热器的散热模型

如若热源或散热器为方形,热源的面积为 A_c,散热器的面积为 A_s,由于在横向热传导稳态后的温度场分布近似为圆形,通过下式变换:

$$a=\sqrt{\frac{A_c}{\pi}},\quad b=\sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \tag{2-55}$$

式中的 a、b 为等效的热源和散热器的半径。将其带入公式(2-54)同样可以求出方形热源与散热器的扩散热阻。YOUNES 将上述的近似解与计算机演算的三维拉普拉斯方程给出的精确解进行了对比($B_i=1$)，见图 2-11，由图可见引入扩散热阻后的近似解具有很好的精度。

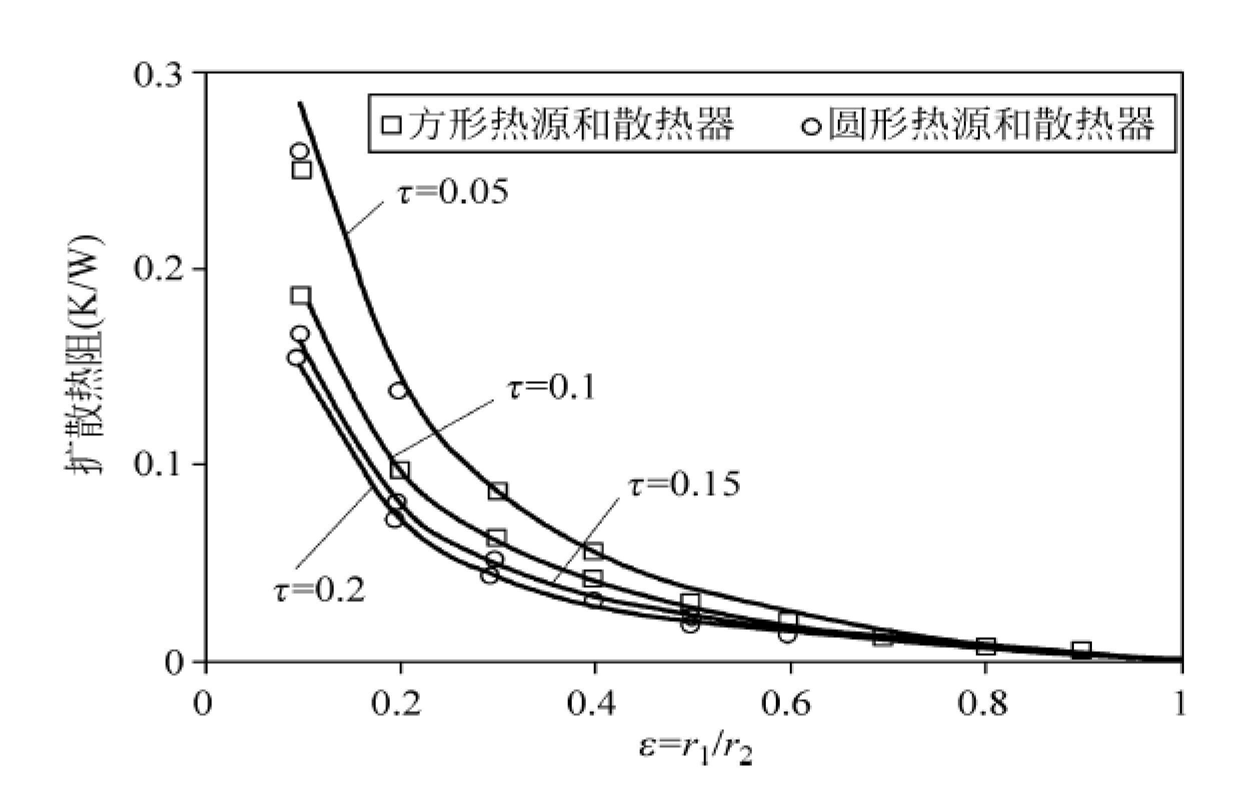


图 2-11　公式(2-54)的近似解与计算机模拟的对比

例题 2-8

一尺寸为 10mm×10mm×1mm 的硅基 IC 芯片通过 0.1mm 的热界面材料贴附在一25mm×25mm×2mm 的纯铜热沉上，热界面材料的热导率为 5W/(m^2·K)，热沉背面的对流换热系数为 2500W/(m^2·K)。求 IC 芯片-热沉-空气的总热阻。

解　由于热沉很薄，可以忽略热沉侧面的热对流，按照公式(2-54)可以求出扩散热阻，总热阻是各层体热阻与对流热阻、扩散热阻之和。

(1) 各层体热阻：

IC 芯片：$R_{\text{die}}=\dfrac{d_{\text{die}}}{\lambda_{\text{die}}A_{\text{die}}}=0.08\text{K/W}$

界面材料：$R_{\text{TIM}}=\dfrac{d_{\text{TIM}}}{\lambda_{\text{TIM}}A_{\text{TIM}}}=0.2\text{K/W}$

热沉：$R_{\text{hs}}=\dfrac{d_{\text{TM}}}{\lambda_{\text{hs}}A_{\text{hs}}}=0.008\text{K/W}$

总的体热阻：$R_c=R_{\text{die}}+R_{\text{TIM}}+R_{\text{hs}}=0.288\text{K/W}$

(2) 对流热阻：$R_{\text{conv}}=\dfrac{1}{\alpha A_{\text{hs}}}=0.64\text{K/W}$

(3) 扩散热阻：$R_{\text{sp}}=\dfrac{(1-\varepsilon)\phi}{\lambda\pi a}=0.151\text{K/W}$

(4) 总热阻：$R_{\text{tot}}=R_c+R_{\text{sp}}+R_{\text{conv}}=1.079\text{K/W}$

由此例题可知体热阻占总热阻的 27%，扩散热阻占总热阻的 14%，对流热阻占总热阻的 59%，也就是说对流换热是本题散热的瓶颈。假设热沉之下还安装有更大的散热

器，在此情况下芯片和热沉的总热阻为 0.439K/W，则此时体热阻占总热阻的 66%，扩散热阻占总热阻的 34%。也就是说一般情况下必须考虑扩散热阻的影响，否则使用公式(2-50)的一维导热热阻公式求得的体热阻将明显偏小，其误差程度与热沉的尺寸、热导率相关，一般热源与热沉尺寸相差越大、热沉的热导率越低，则误差越大，其相互关系如图 2-11 所示。

2.5.3 接触热阻及热界面材料

上述讨论的传导热阻是一种体热阻，即是一种由材料性质决定的热阻，实际应用中需要将两种或多种不同性质的材料连接在一起构成一个传热系统，称各个物体接触面之间的热阻为接触热阻，产生接触热阻的直接原因为两种材料之间的间隙。

宏观光滑的物体表面在微观尺度仍然是“粗糙”的，比如经过精密磨抛处理后金属表面的粗糙度在 0～500nm 范围，氧化铝陶瓷的粗糙度最好在 0～200nm 范围，仅仅通过普通简单处理的氧化铝陶瓷表面粗糙度在数微米范围。这样的两个表面连接后，其连接面处将会出现许多“空气芯”，由于常温下空气的热导率低于 0.03W/(m·K)，属于热的不良导体，所以，在散热系统中接触热阻往往比体热阻对系统的影响更为重要，而且由于界面状态的不确定性，接触热阻的离散性更大，处理更为困难。

为了更加容易地量化讨论界面处的接触热阻，引入界面热阻的概念。所谓界面热阻 R_{int} 是指两材料界面处单位接触面积上的接触热阻 R_c，即

$$R_{int} = \frac{R_c}{A} \tag{2-56}$$

式中，A 为两材料界面处的接触面积，界面处的温度差为

$$\Delta T_{int} = QR_c = QAR_{int} \tag{2-57}$$

式中，Q 为流经界面的热流量。

例题 2-9

金属板材 A 压接在金属材料 B 上，由于均为非理想的“镜面”，在未施加压力的条件下，平均间距 0.3mm。请计算它们的界面热阻。若使用螺丝将二者压紧，平均间距 0.15mm，请再计算它们的界面热阻。如果有 1000W/m² 的热流密度流经界面，两种情况下的界面温差分别是多少？

解

(1) 未施加压力的界面热阻为

$$R_{int} = \frac{R_c}{A} = \frac{d}{\lambda} = 0.01\mathrm{m^2 \cdot K/W}$$

此时界面的温差为 $\Delta T_{int} = QR_c = qAR_c = 10\mathrm{K}$

(2) 当施加压力的界面热阻为

$$R_{int} = \frac{R_c}{A} = \frac{d}{\lambda} = 0.005\mathrm{m^2 \cdot K/W}$$

此时界面的温差为

$$\Delta T_{int} = QR_c = 5\mathrm{K}$$

由此可见采用机械方法给予界面压力，可以明显减少界面热阻和温度差。图 2-12 是两种材料界面热阻产生温度差的情况，当分别给 A 和 B 材料外端面施加“热源”和“冷源”，热平衡后即可测得如图 2-12(a)所示的温度分布，当测出各个材料的厚度后由对应的温差就可计算出两种材料的接触热阻，常用此方法测量薄板材料、界面材料的热阻数值，称这种测量热阻的方法为平板法，图 2-12(b)为一种实际的平板法热阻测量装置。

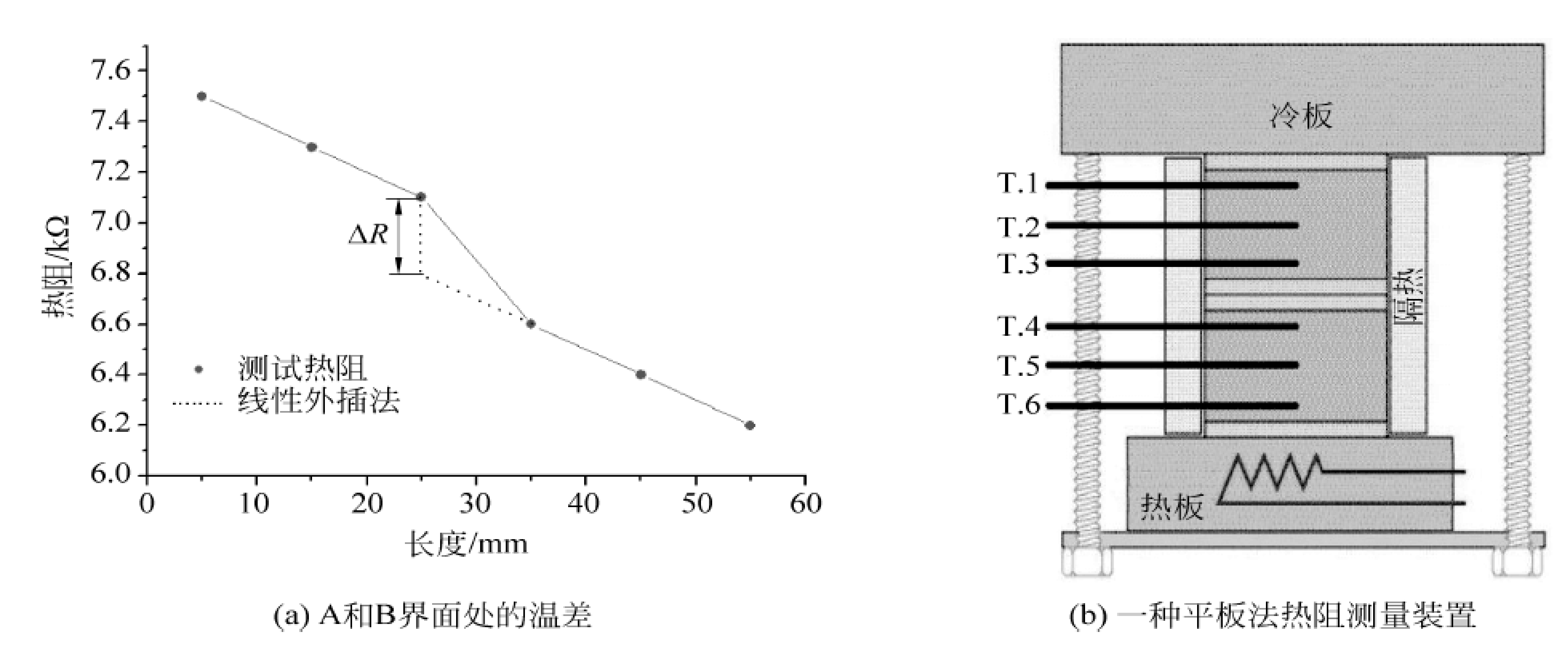


图 2-12　A 和 B 界面处的温差和一种平板法热阻测量装置

由公式(2-56)也可看出，若使用某种高导热材料填充空气间隙也可以大大地降低接触热阻，此外，还要求该材料具有柔软、易变形、无腐蚀、难外溢的理化特性，称这种材料为热界面材料(thermal interface materials，TIM)。界面材料由基材和导热固体颗粒组成，典型的基材包括硅胶、聚合橡胶、环氧树脂等，常见的导热固体颗粒填充物包括氧化铝、氮化铝、氮化硼、氧化镁、金刚石、石墨、金属等。常见的 TIM 的形态和类型有膏状的导热脂、导热胶和片状的导热带、导热橡胶垫、导热相变材料等。使用中，前者把膏体涂抹在一种材料端面，然后将另外一种材料压实在其端面。后者将裁剪成合适大小与形状的 TIM 片直接放在端面并将另外一种材料压实固定在其端面即可。

例题 2-10

在前述例题所述条件下，在 A 和 B 间涂抹一层 TIM，其热导率为 0.3W/(m·K)，使用螺丝将二者压紧，平均间距 0.15mm，计算它们的界面热阻和温度差。

解　将 TIM 的热导率替代空气的热导率带入公式，可得接触热阻：

$$R_{\text{int}} = \frac{R_c}{A} = \frac{d}{\lambda} = 0.001\text{m}^2\cdot\text{K/W}$$

界面间的温差为

$$\Delta T_{\text{int}} = QR_c = 0.5\text{K}$$

由此可见，TIM 确实可以大幅减小界面热阻、降低界面的温差。

界面材料的重要属性包括：

(1) 热导率：TIM 的热导率由基材和导热固体颗粒填充物共同决定，填充物成分多则热导率会提高，但是，过多的填充物将影响 TIM 的可填充特性。一般导热带、导热橡胶垫的热导率低于 1W/(m·K)，导热脂和导热膏的热导率可大于 1W/(m·K)，最好的相

变材料的热导率可接近 10W/(m·K)；

(2) 柔性：更软、更易变形的 TIM 更能紧密贴合材料的粗糙表面，可使 TIM 和材料接触面的空气芯体积最小化；

(3) 厚度：涂覆 TIM 的厚度正比于接触热阻，所以，希望 TIM 中填充颗粒外形接近圆形、尺寸尽量小；

(4) 弹性模量：希望 TIM 的弹性模量小些为佳，因为此时使用较小的压力即可将 TIM 均匀挤压在两个材料端面，获得空气芯最小、厚度也最小的 TIM 层。同时，小的压力也降低了损害电子器件及封装结构的风险；

(5) 绝缘性：从可靠性设计角度出发，希望散热通道和电器通道相互隔离，而通常的管壳和散热器端面为金属材料的情况居多，故此，一般情况下要求 TIM 具有高的绝缘性能；

(6) 稳定性和可靠性：TIM 组装应用系统后将会承受高温、高低温循环、风吹雨淋和酸雨腐蚀等恶劣的工作环境，必须保证其理化性能稳定、可靠，其参数的变化在规定的范围内；

(7) 腐蚀性：如前所述，TIM 多夹持在两个金属端面间，要求 TIM 本身不对金属端面产生任何的腐蚀，必须是中性的材料；

(8) 方便性：易于使用，无论是膏状还是片状 TIM 均要易于涂覆或放置，也易于剥离和取下。

2.5.4 热阻网络

假设热流依次垂直通过三个串联的平板时，左侧平板外端面温度最高为 T_1，环境温度为 $T_{0,1}$；右侧平板外端的温度最低为 T_4，环境温度为 $T_{0,2}$；并假设平板内部无热源且其他四个周边面为隔热状态，其他参数如图 2-13 所示。

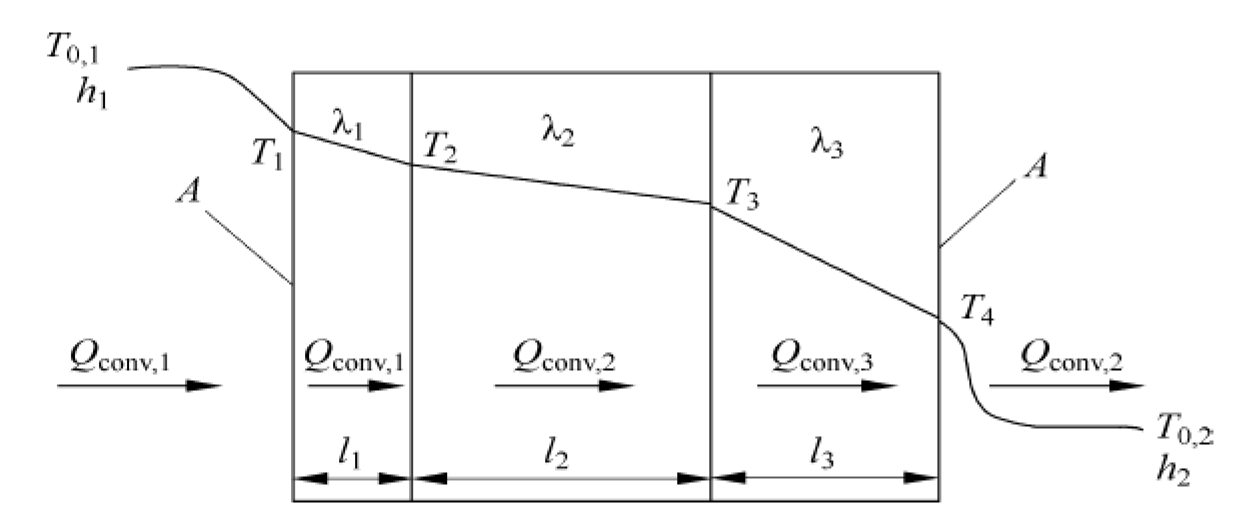


图 2-13 串联热阻模型及温度分布示意图

该导热问题为无内热源的一维热传导，进入每个平板的热流量相等，即：

$$Q_{conv,1} = Q_{cond,1} = Q_{cond,2} = Q_{cond,3} = Q_{conv,2} = Q$$

$$Q = \frac{T_{0,1} - T_1}{R_{conv,1}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond,1}} = \frac{T_2 - T_3}{R_{cond,2}} = \frac{T_3 - T_4}{R_{cond,3}} = \frac{T_4 - T_{0,2}}{R_{conv,2}}$$

数学处理后：

$$Q = \frac{T_{0,1} - T_1 + T_1 - T_2 + T_2 - T_3 + T_3 - T_4 + T_4 - T_{0,2}}{R_{\text{conv},1} + R_{\text{cond},1} + R_{\text{cond},2} + R_{\text{cond},3} + R_{\text{conv},2}}$$

式中各部分热阻分别为

$$R_{\text{conv},1} = \frac{1}{h_1 A}, \quad R_{\text{cond},1} = \frac{l_1}{\lambda_1 A}, \quad R_{\text{cond},2} = \frac{l_2}{\lambda_2 A}, \quad R_{\text{cond},3} = \frac{l_3}{\lambda_3 A}, \quad R_{\text{conv},2} = \frac{1}{h_2 A}$$

由式(2-58)求得总热阻 R_{tot} 和总的导热热阻 $R_{\text{cond,tot}}$ 为

$$Q = \frac{T_{0,1} - T_{0,2}}{R_{\text{tot}}} = \frac{T_1 - T_4}{R_{\text{cond,tot}}} \tag{2-58}$$

$$R_{\text{tot}} = R_{\text{cond,tot}} + R_{\text{conv},1} + R_{\text{conv},2} \tag{2-59}$$

$$R_{\text{cond,tot}} = R_{\text{cond},1} + R_{\text{cond},2} + R_{\text{cond},3} \tag{2-60}$$

按照此思路可以推导出 n 个串联平板的总传导热阻和总热阻，为

$$R_{\text{cond,tot}} = \sum_{i=1}^{n} R_{\text{cond},i} \tag{2-61}$$

$$R_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{n} R_{\text{cond},i} + R_{\text{conv},1} + R_{\text{conv},2} \tag{2-62}$$

由此式可见串联平板的总热阻与串联电阻的公式形式一致，其传导总热阻等于各层平板传导热阻之和，串联热阻网络如图 2-14 所示，图中箭头表示热流方向。

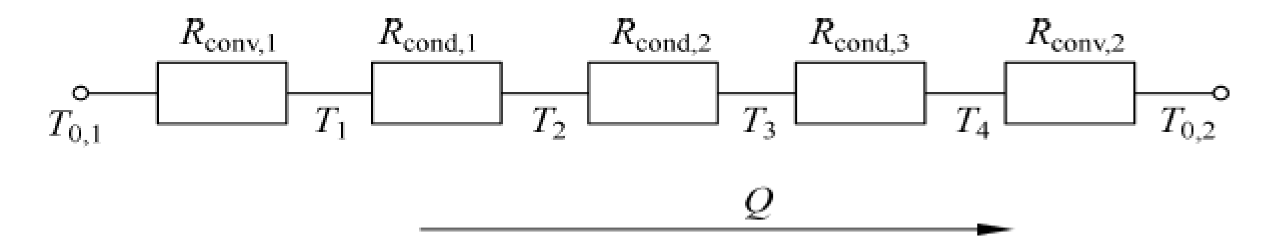
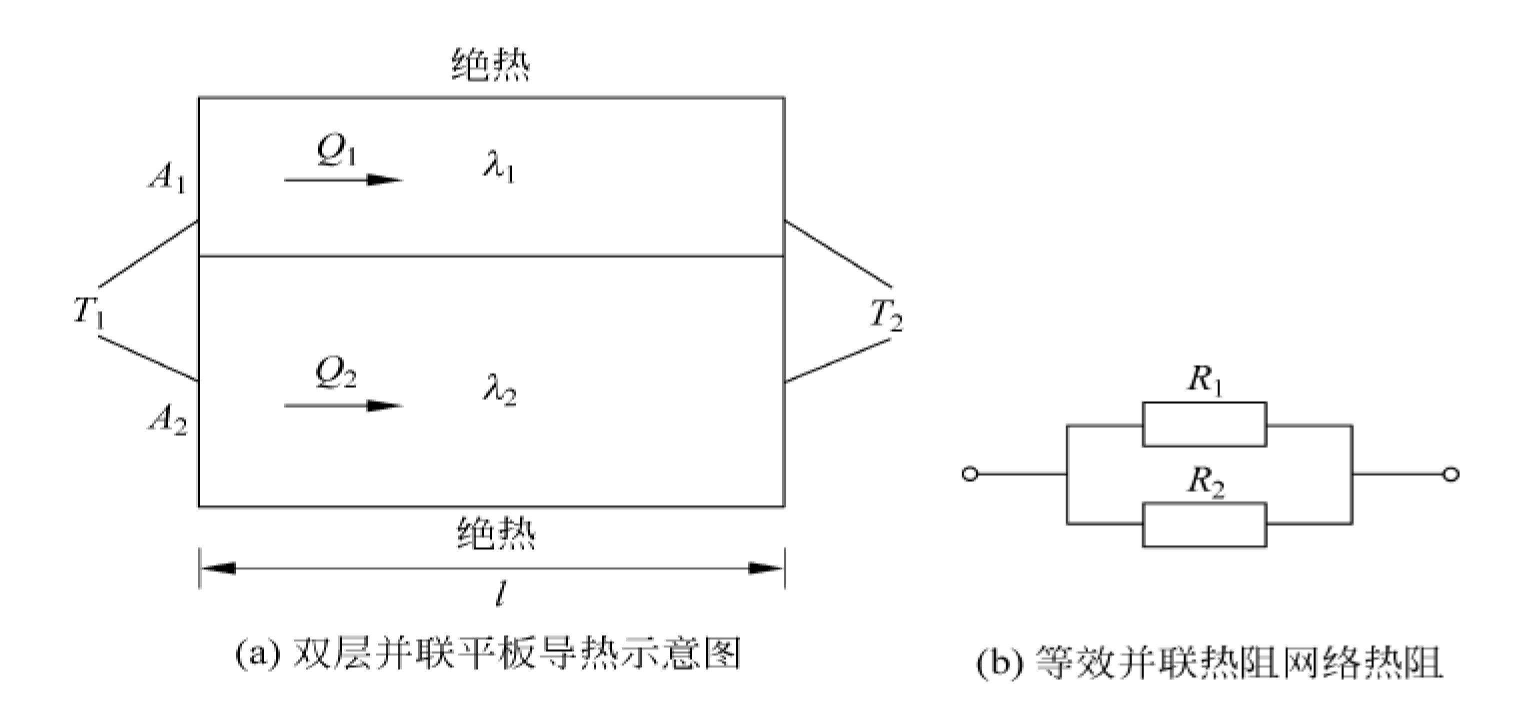


图 2-14　三层串联平板的热阻网络图



(a) 双层并联平板导热示意图　　(b) 等效并联热阻网络热阻

图 2-15　双层并联平板导热示意图和等效并联热阻网络热阻

另外一种情况如图 2-15 所示的双层并联平板，假设热流量从左端面传导至右端面，稳态后左端面的温度为 T_1，右端面的温度为 T_2，上面平板的热导率为 λ_1，从它传导的热流分量为 Q_1。下面平板的热导率为 λ_2，从它传导的热流分量为 Q_2。上平板的上部和下平板的底部隔热。由此模型可知通过两个平板的总热流量 Q 为分别通过上下平板的热流量分量之和，即：

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{T_1 - T_2}{R_1} + \frac{T_1 - T_2}{R_2} = (T_1 - T_2)\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{cond,tot}}} \tag{2-63}$$

由此可得总传导热阻 $R_{\text{cond,tot}}$ 为

$$\frac{1}{R_{\text{cond,tot}}} = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{2-64}$$

按照此思路可以求出 n 个并联平板的总传导热阻为

$$\frac{1}{R_{\text{cond,tot}}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \tag{2-65}$$

下面讨论图 2-16 所示的复杂系统，该系统由三块平板组成，左边的两块并行之后与右边的一块串行，其尺寸和热导率如图所示，热流量从左侧进入右侧输出斜线区域为绝热状态。由前述串并联热阻的讨论同样可以推导出该系统的总传导热阻 $R_{\text{cond,tot}}$ 为

$$R_{\text{cond,tot}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3 \tag{2-66}$$

式中 R_1、R_2、R_3 分别是三块平板的传导热阻，图 2-17 为其等效热阻网络拓扑结构图。同理可以推导出 n 块并行、m 块串行平板的总传导热阻，可由下式表示：

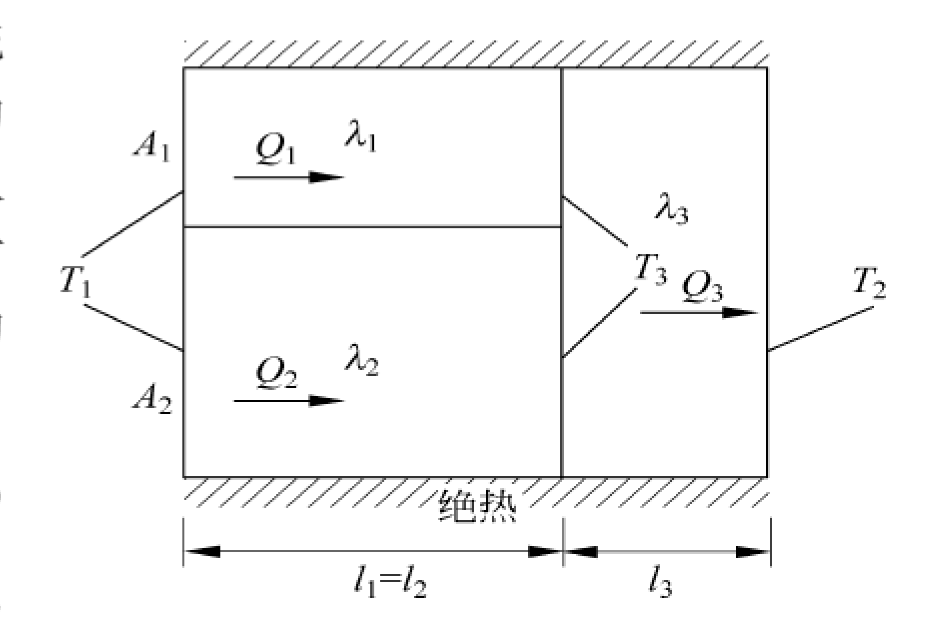


图 2-16　三个平板构成的一个复杂传热系统

$$R_{\text{cond,tot}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_{i,\text{cond}}}} + \sum_{j=1}^{m} R_{\text{cond},j} \tag{2-67}$$

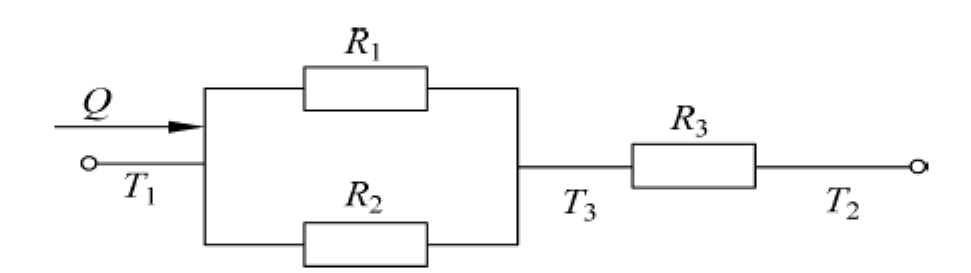


图 2-17　三个平板传热系统的等效热阻网络

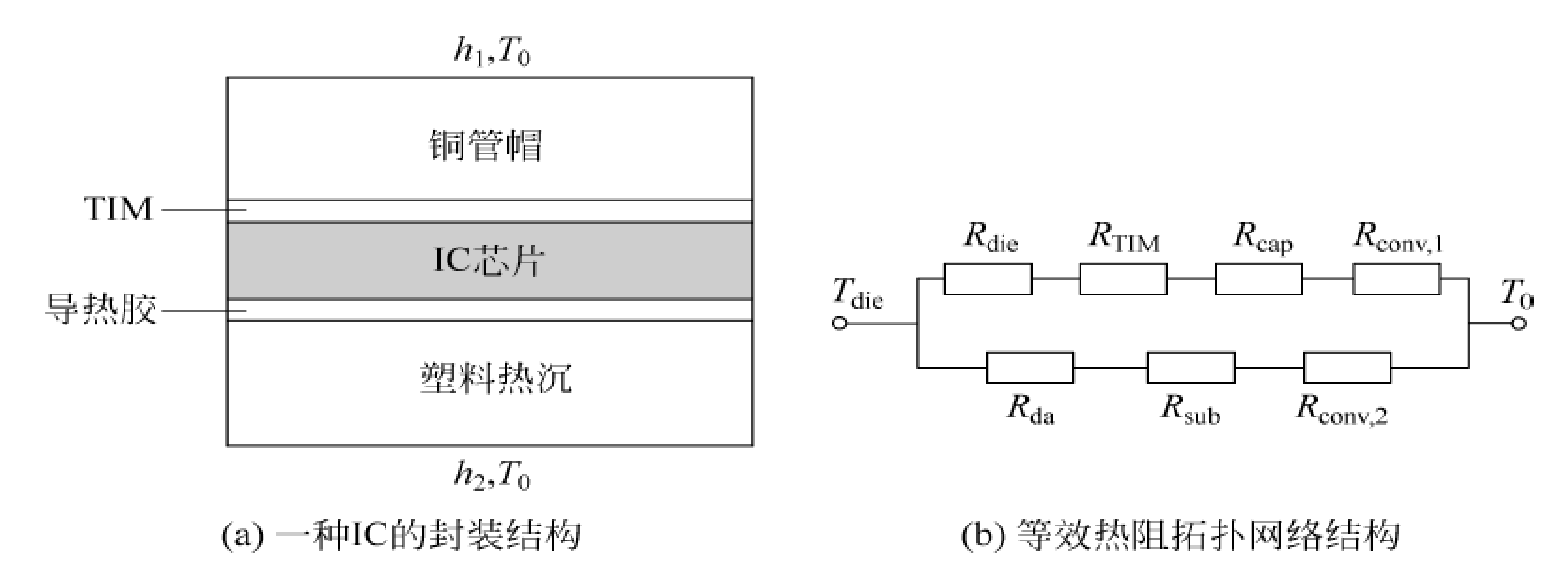
例题 2-11

长宽均为 25mm，厚为 1mm 的硅基 IC 芯片底面通过导热胶粘接在 1.2mm 厚的热沉上，上表面通过 TIM 粘接在一 2mm 厚的纯铜管帽上，衬底和管帽的面积与 IC 芯片一样，如图 2-18(a)所示。塑料热沉的热导率为 0.2W/(m²·K)，导热胶的热导率为 2W/(m²·K)，TIM 的热导率为 5W/(m²·K)，管帽侧对流换热系数为 2500W/(m²·K)，衬底侧对流换热系数为 20W/(m²·K)，求 IC 芯片底面与外部环境间的热阻。

解　设热沉底、管帽外部的环境温度相同，可以依题意推导出热阻网络，如图 2-18(b)所示，并求出相应的传导热阻和对流热阻，分别为

(1) 芯片传导热阻：$R_{\text{die}} = \dfrac{d_{\text{die}}}{\lambda_{\text{die}} A_{\text{die}}} = 0.013\text{K/W}$。

(2) TIM 传导热阻：$R_{\text{TIM}} = \dfrac{d_{\text{TIM}}}{\lambda_{\text{TIM}} A_{\text{TIM}}} = 0.032\text{K/W}$。



(a) 一种IC的封装结构　　(b) 等效热阻拓扑网络结构

图 2-18　一种 IC 的封装结构及其等效热阻拓扑网络结构

(3) 管帽传导热阻：$R_{\mathrm{cap}}=\dfrac{d_{\mathrm{cap}}}{\lambda_{\mathrm{cap}}A_{\mathrm{cap}}}=0.008\mathrm{K/W}$。

(4) 管帽对流热阻：$R_{\mathrm{conv,cap}}=\dfrac{1}{\alpha_{\mathrm{cap}}A_{\mathrm{cap}}}=0.64\mathrm{K/W}$。

(5) 导热胶传导热阻：$R_{\mathrm{da}}=\dfrac{d_{\mathrm{da}}}{\lambda_{\mathrm{da}}A_{\mathrm{da}}}=0.08\mathrm{K/W}$。

(6) 热沉传导热阻：$R_{\mathrm{sub}}=\dfrac{d_{\mathrm{sub}}}{\lambda_{\mathrm{sub}}A_{\mathrm{sub}}}=9.6\mathrm{K/W}$。

(7) 热沉对流热阻：$R_{\mathrm{conv,sub}}=\dfrac{1}{\alpha_{\mathrm{syb}}A_{\mathrm{sub}}}=80\mathrm{K/W}$。

IC 芯片底面与外部环境间热阻 $R_{\mathrm{die\text{-}ambient}}$(简称总热阻)的倒数等于向上管帽方向四个热阻之和(0.693K/W)的倒数与向下热沉方向三个热阻之和(89.68K/W)倒数的和，由此可以求得

$$R_{\mathrm{die\text{-}ambient}}=0.688\mathrm{K/W}$$

讨论

通过数据对比发现，向上管帽方向的热阻仅略高于总热阻，而向下热沉方向的热阻远远高于总热阻，即本题讨论的系统有效散热通道为向上的管帽方向，称此为主散热通道。

2.5.5　常用散热器

1. 电路板

将 LED 器件、驱动及控制电路安装在制好电路层的印刷电路板(PCB)上才能组成可以使用的 LED 光源灯具等应用产品。PCB 的作用不仅仅是完成系统的电气连接和物理支撑，还要承担电子器件和光电子器件的部分散热，特别是大面积的金属接地层和电源层。关于 PCB 的详细介绍将在后续章节进行，本节将以常用的双面覆铜 PCB 板为例讨论其热阻特性，样品结构示意图及尺寸参数如图 2-19 所示，电路层为热导率高达近 400W/(m·K)的纯铜箔，该层的热导率及厚度用 λ_{c}、$d_{\mathrm{c},i}$ 表示，它夹持着热导率仅为 0.35W/(m·K)的环氧玻璃纤维绝缘层，绝缘层的热导率及厚度用 λ_{e}、$d_{\mathrm{e},i}$ 表示。由此可知

PCB 板的热导率具有很强的各向异性特征，大部分热流量将沿着铜电路层方向横向传递，仅有少部分通过电路层进入相连的绝缘介质层。PCB 板的传热示意图如图 2-20 所示。可以分别用一维近似方法推导出垂直方向及平行方向的传导热阻。

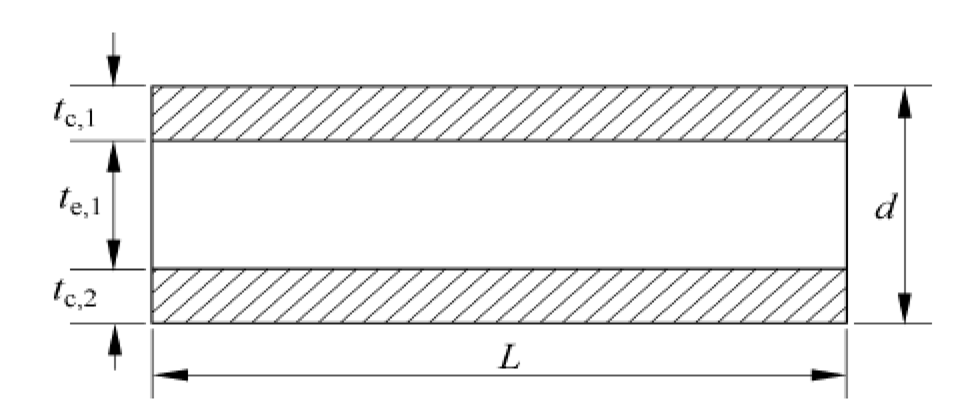


图 2-19　双层覆铜 PCB 板结构示意图及尺寸参数

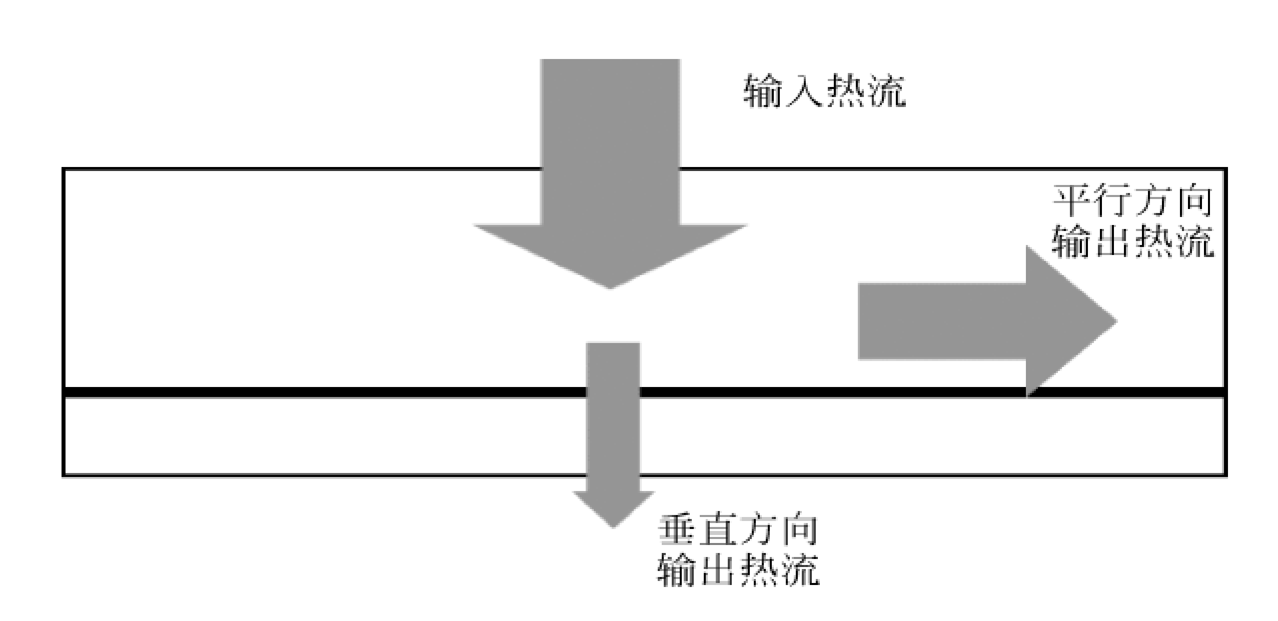


图 2-20　PCB 的传热途径示意图

垂直方向传导热阻 R_n：

$$R_n = R_{e,1} + R_{c,1} + R_{c,2}$$

$$R_n = \frac{d_{e,1}}{\lambda_e A} + \frac{d_{c,1}}{\lambda_c A} + \frac{d_{c,2}}{\lambda_c A}$$

$$R_n = \frac{d_e}{\lambda_e A} + \frac{d_c}{\lambda_c A} = \frac{d}{\lambda_n A} \tag{2-68}$$

式中 t_e、t_c 分别为绝缘介质层厚度之和及电路层厚度之和，t 为绝缘层和电路层总厚度 $t = t_e + t_c$，λ_n 为 PCB 纵向有效热导率，如式(2-69)所示。

$$\lambda_n = \frac{d}{\dfrac{d_e}{\lambda_e} + \dfrac{d_c}{\lambda_c}} \tag{2-69}$$

平行方向传导热阻 R_p 为

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_{e,1}} + \frac{1}{R_{c,1}} + \frac{1}{R_{c,2}}$$

$$\frac{1}{R_p} = \frac{\lambda_e\ d_{e,1} w}{l} + \frac{\lambda_c\ d_{c,1} w}{l} + \frac{\lambda_c\ d_{c,2} w}{l}$$

$$= \frac{\lambda_e\ d_e w + \lambda_c\ d_c w}{l}$$

可得

$$R_p = \frac{l}{(\lambda_e d_e + \lambda_c d_c)W} = \frac{l}{\lambda_p A} \tag{2-70}$$

式中，l、w 分别为 PCB 长度、宽度；λ_p 是 PCB 横向有效热导率，为

$$\lambda_p = \frac{d_e \lambda_e + d_c \lambda_c}{d} \tag{2-71}$$

d 为 PCB 总厚度。

上述 PCB 热阻公式不仅适合于任意层电路层和绝缘层的普通电路板，同样也适合于以后章节待讨论的铝基电路板(铝基板)。

其次，要注意上述公式成立的条件为热流量的传导仅发生在垂直 PCB 方向和平行 PCB 方向，即两个方向的热传导均可做一维近似。更多情况下并不满足这个条件，如将 LED 器件、驱动 IC 安装在 PCB 的电路层，这些器件的面积远小于 PCB 面积，此时扩散热阻将起到非常重要的作用，在垂直方向的热传导中必须考虑扩散热阻，即该方向总热阻应等于 PCB 的体热阻与扩散热阻之和。此外，PCB 表面的对流系数、热源在 PCB 中的位置也将影响 PCB 的垂直方向等效热导率。

为了增大垂直方向的等效热导率，通常采用在 PCB 板上制作导电通孔的办法。其方法是首先利用金刚石钻头或激光在 PCB 制作通孔，之后在通孔内电镀镍铜，理想情况下将孔内部镀满纯铜，也可以镀上一层纯铜后再填充有机物封孔，如图 2-21 所示。该通孔在电学上可以大面积的接地，抑制电磁干扰和噪声；在热学上可以利用贯通 PCB 基板的高导热铜柱降低纵向的热阻，即提高 PCB 垂直方向的有效热导率。假设在理想孔内部镀满纯铜的条件下，每个通孔的传导热阻为

$$R_{via} = \frac{d}{\lambda_c \pi r_c^2} \tag{2-72}$$

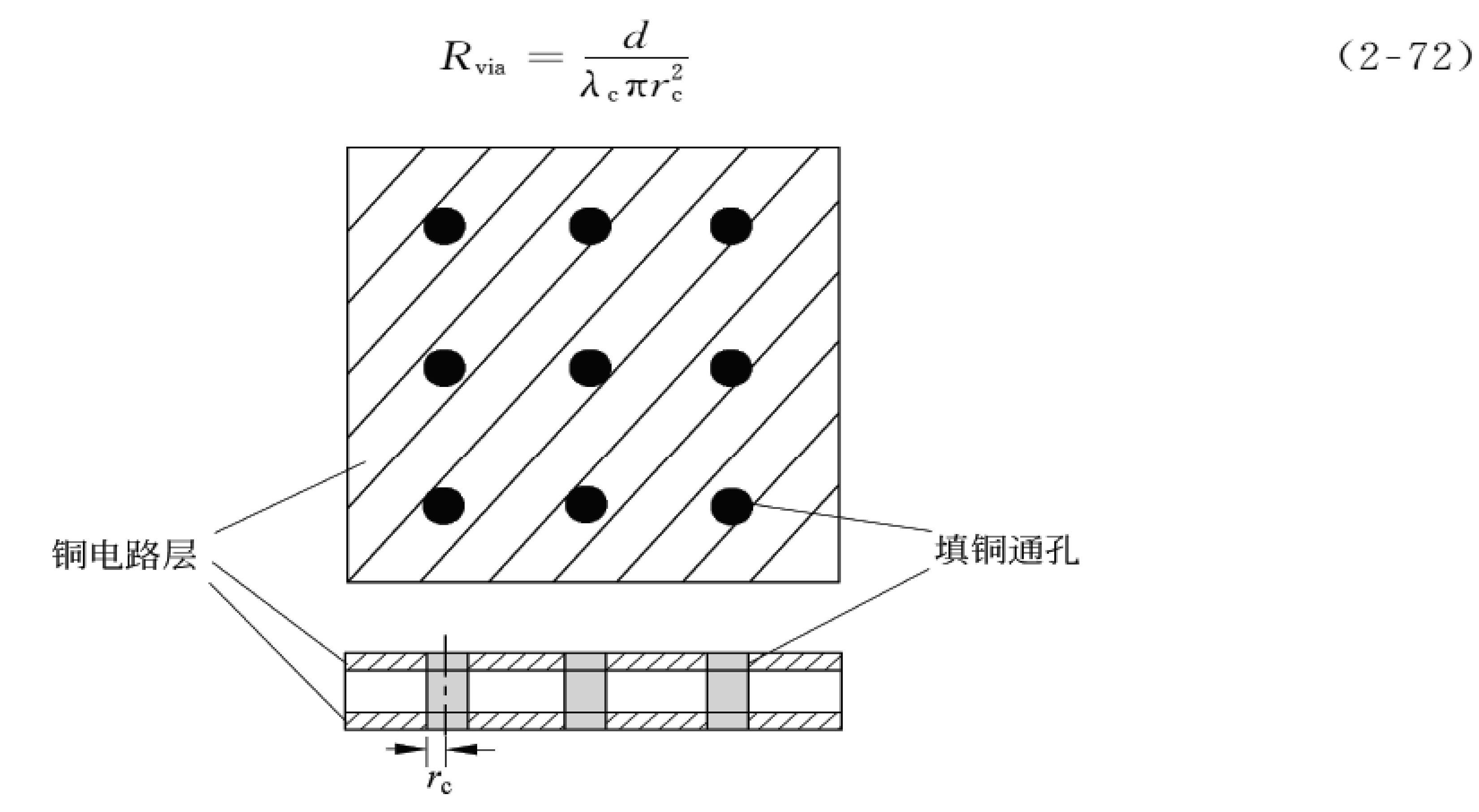


图 2-21　PCB 上的导电通孔示意图

式中 λ_c、r_c 分别为通孔半径和铜的热导率。假设 PCB 上打了 n 个相同孔径的通孔，则垂直方向总的传导热阻 $R_{n,wv}$ 为 PCB 垂直方向热阻与 n 个通孔热阻的并联，即

$$\frac{1}{R_{n,wv}} = \frac{n}{R_{via}} + \frac{\lambda_n (lw - n\pi r_c^2)}{t} = \frac{t}{lw\lambda_{n,wv}} \tag{2-73}$$

式中，l、w、t 为 PCB 长、宽、厚度；$\lambda_{n,wv}$ 为带有镀铜通孔 PCB 垂直方向的有效热导率。

例题 2-12

有一双层覆铜 PCB,正反面纯铜电路层的厚度均为 60μm,玻璃环氧绝缘层的热导率为0.33W/(m·K),求其在垂直、平行方向的热阻和有效热导率。如果在其上制出 100 个半径为 100μm 的镀铜通孔,垂直方向的热阻和有效热导率变为多少?假设 PCB 长宽厚分别为 100mm、100mm 和 1mm。

解

(1) 无通孔时垂直方向的有效热导率:$\lambda_n=\dfrac{d}{\dfrac{d_e}{\lambda_e}+\dfrac{d_c}{\lambda_c}}=0.37\text{W/(m·K)}$

热阻 $R_n=\dfrac{d}{A\lambda_n}=0.3\text{K/W}$

(2) 无通孔时横方向的有效热导率 λ_p:$\lambda_p=\dfrac{d_e\lambda_e+d_c\lambda_c}{d}=42\text{W/(m·K)}$

热阻 $R_p=\dfrac{d}{A\lambda_p}=21\text{K/W}$

(3) 有通孔时垂直方向的热阻 $R_{n,wv}$ 为

通孔热阻 $R_{via}=\dfrac{d}{\lambda_c\pi r_c^2}=81.6\text{K/W}$

$$\frac{1}{R_{n,wv}}=\frac{n}{R_{via}}+\frac{\lambda_n(lw-n\pi r_c^2)}{t}=15.55\text{W/K}$$

$$R_{n,wv}=0.064\text{K/W}$$

有效热导率:$\lambda_{n,wv}=\dfrac{d}{R_{n,wv}lw}=1.75\text{W/(m·K)}$

结论

(1) 普通环氧玻璃 PCB 板的纯铜电路层并没有明显改善垂直方向的导热性能,其有效热导率约低于平行方向 2 个数量级;

(2) 在普通环氧玻璃 PCB 板上打孔镀铜可以明显改善垂直方向的导热性能,此例中的有效热导率比无孔的提高了约 4 倍。通孔孔径越大、数量越多、孔内镀铜越充分则提高的倍数越多。

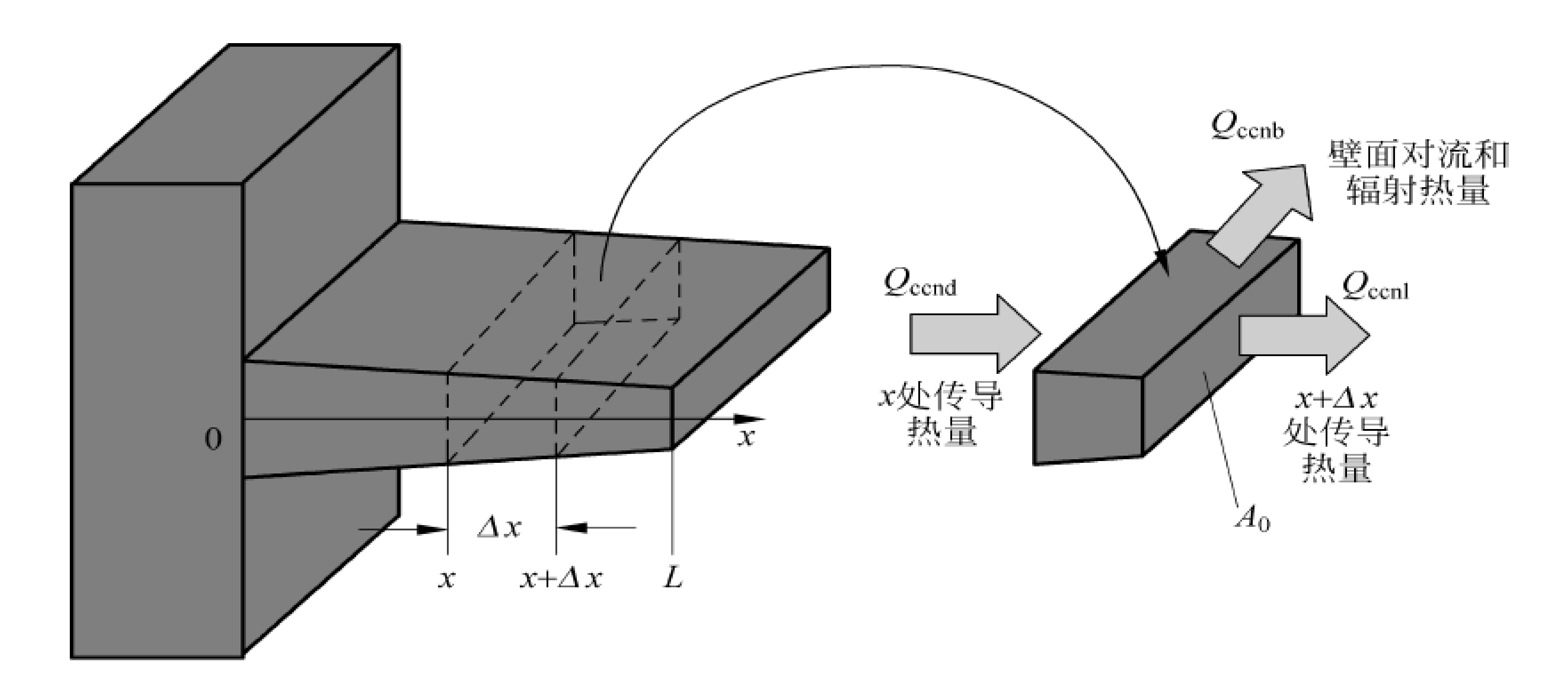
2. 单翅片散热器

翅片散热器是电子器件、IC 和光电子器件最常用的散热部件,通常形状为在一底面平板上竖直排放若干并行的散热平板,实际的翅片散热器可以看成是由多个单翅片散热器并联而成,如图 2-22 所示。将翅片散热器的底面与热源粘贴在一起,则热源热量通过翅片散热到空气中,从热源输出的热流量在翅片散热器中的散热过程和路径如图 2-23 所示。

根据能量守恒定律,从热源表面输出的热流量 Q 等于从翅片散热器表面通过对流和辐射散热出去的总热流量,即

$$Q=\alpha_{con}A(T_s-T_a)+h_{rad}A(T_s-T_a)=\alpha A(T_s-T_a) \tag{2-74}$$

式中,α 为包括了对流换热和辐射换热在内的综合换热系数;A 为散热器翅片表面积。由此式可知,通过增强对流、辐射换热系数或者增大散热器表面积都可以提高散热能力。



(a) 一种典型的翅片散热器单元结构示意图　　(a) 微元的热流量变化示意图

图 2-22　一种典型的翅片散热器单元结构及其微元的热流量变化示意图

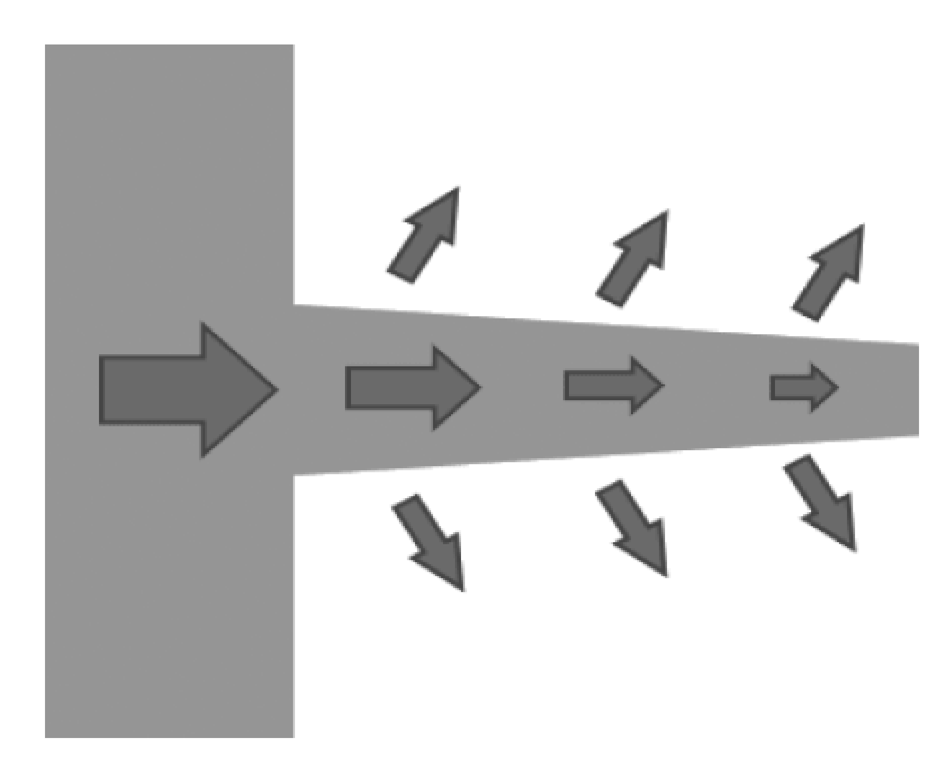


图 2-23　热流量在翅片散热器中的散热过程和路径示意图

对于翅片散热器而言提高散热量的原理在于多个较薄的翅片增加了散热器的有效表面积，从而达到提高散热量的目的。

设翅片散热器位于图 2-22(a)所示的坐标系中，坐标原点位于散热器底座上表面处，翅片散热器单元的参数为：翅片长度为 l，位于 x 处的翅片横截面积为 A_c、周长为 P'、热导率为 λ、温度为 T，翅片表面综合换热系数为 α_{comb}。假设 α_{comb} 和环境温度 T_a 在翅片表面各处为恒定值，T、A_c、P'、λ 仅为 x 的函数。热源热流量从 $x=0$ 处输入，在沿 x 方向导热的同时不断连续地向外部环境对流、辐射热量，从而使翅片温度沿 x 不断降低。为书写方便，在此将 α_{comb} 简写为 α。

稳态条件下，图 2-22(b)中 x 处的体积微元，根据能量守恒方程可知在翅片内部不包含热源时，输入与输出 x 处微元 $A_c(x)\Delta x$ 的传导热流量差应等于该微元辐射与对流散热出的热流量，即为

$$Q_{cond,x} - Q_{cond,x+\Delta x} = Q_{comb} \tag{2-75}$$

式中，Q_{comb} 可由公式(2-36)和(2-47)得到，代入并对 x 微分整理可得：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(\lambda A_{\mathrm{c}}\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)-\alpha\frac{\mathrm{d}A}{\mathrm{d}x}(T-T_{\mathrm{a}})=0 \tag{2-76}$$

称该式为翅片方程，是翅片散热的通用表达形式。

若翅片热导率、横截面积 A_c 与周长 P 均为常数，即 $\mathrm{d}A=P\mathrm{d}x$，则翅片方程可以简化为：

$$\lambda A_{\mathrm{c}}\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2}-\alpha P'(T-T_{\mathrm{a}})=0 \tag{2-77}$$

设 $\varphi=T-T_a$，$\beta=\sqrt{\alpha P'/\lambda A_c}$，则上式变为

$$\frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}x^2}-\beta^2\theta=0 \tag{2-78}$$

该式的通解为

$$\theta=\mathrm{C}_1\mathrm{e}^{\beta X}+\mathrm{C}_2\mathrm{e}^{-\beta X} \tag{2-79}$$

式中的常数 C_1、C_2 由边界条件决定。

由前述讨论可知，翅根 $x=0$ 处为热流量输入面，此处的温度为常量 T_b，即

$$T(x=0)=T_{\mathrm{b}},\quad 即\ \theta(x=0)=\theta_{\mathrm{b}} \tag{2-80a}$$

由于翅片顶部的面积一般均远远小于翅片顶面积，所以，忽略顶部的热导率、辐射散热的热流量，一般不会对翅片散热的结果造成大的误差，也就是说将翅片顶部视为绝热是合理的，绝热条件可表示为

$$\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)\bigg|_{x=L}=0,\quad 即\left(\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}x}\right)\bigg|_{x=L}=0 \tag{2-80b}$$

将上述边界条件带入通解，可以求得常数

$$\mathrm{C}_1=\frac{\theta_{\mathrm{b}}\mathrm{e}^{-\beta L}}{\mathrm{e}^{\beta L}+\mathrm{e}^{-\beta L}},\quad \mathrm{C}_2=\frac{\theta_{\mathrm{b}}\mathrm{e}^{\beta L}}{\mathrm{e}^{\beta L}+\mathrm{e}^{-\beta L}} \tag{2-80c}$$

最终可得翅顶隔热近似下翅片散热单元的温度分布结果为

$$T(x)-T_{\mathrm{a}}=(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{a}})\frac{\cosh[\beta(L-x)]}{\cosh(\beta L)} \tag{2-80d}$$

式中 T_b 为 $x=0$ 处（翅根）的温度。

由于翅片总的辐射、对流散热流量等于传入翅根处的热传导热流量，可求得该翅片散热器单元的总散热流量为

$$Q=-\lambda A_{\mathrm{c}}\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}x}\right)\bigg|_{x=0}=\sqrt{\alpha\lambda P'A_{\mathrm{c}}}(T_{\mathrm{b}}-T_{\mathrm{a}})\tanh(\beta L) \tag{2-81}$$

讨论

（1）当 L 无限长时，$\tanh(\beta L)\propto 1$，则 $Q=\sqrt{\alpha\lambda P'A_c}(T_b-T_a)$，即此时为无限长翅片近似。当 $\beta L=3$ 时，Q'（翅顶绝热近似）$=99.5\%\ Q$（无限长近似），也就是说此时使用无限长翅片近似精度足够；

（2）分析表明引入等效翅片长度 L_c 替代实际长度 L 后，则可消除翅顶绝热近似忽略翅顶对流、辐射带来的散热误差

$$L_{\mathrm{c}}=L+\frac{A_{\mathrm{c}}}{P'} \tag{2-82}$$

(3) 分析还表明,翅片有效长度的方法还适合于其他形状翅片的近似,例如:

直径为 ϕ 的针状翅片为

$$L_c = L + \frac{\phi}{4} \tag{2-83}$$

厚度为 d、宽度为 w 的矩形薄板翅片为

$$L_c = L + \frac{0.5dw}{(d+w)} \tag{2-84a}$$

当 $d \ll w$ 时则变为

$$L_c = L + \frac{d}{2} \tag{2-84b}$$

将翅片有效长度替代 L 代入公式(2-80)即可得到更为精确的翅片最大传热量,或者其他形状翅片的最大传热量。

在散热器基板上增加翅片可以增大散热器的对流与辐射散热面积,但是,同时也额外添加了一个翅片的导热热阻。为了更为方便地描述翅片的散热能力,引入翅片热阻、功效和效率三个物理量。

(1) 翅片热阻 R_f:定义翅片热阻为翅根和环境温度之差与翅片散热量之比,按照公式(2-81)可得翅顶隔热近似下翅片的热阻为

$$R_f = \frac{1}{\sqrt{\alpha P \lambda A_c}\tanh(\beta L)} \tag{2-85}$$

(2) 翅片功效 ε_f:定义翅片功效为翅片表面 A_f 的散热热流量与无翅片时散热器基板等于翅基截面积 A_b 表面的散热热流量之比,也等于翅基热阻与翅片热阻之比。由于翅基基板换热流量为

$$Q_{nf} = \alpha A_b (T_b - T_a)$$

则翅顶隔热近似下,翅片的功效为

$$\varepsilon_f = \sqrt{\frac{\lambda P'}{\alpha A_c}}\tanh(\beta L) \tag{2-86}$$

(3) 翅片效率 η_f:定义翅片效率为实际传热量与最大传热量之比,翅片的最大传热量应为翅片热导率为无穷大,即翅片为均温,且该温度与翅基温度相同,为

$$Q_{f,max} = \alpha A_f (T_b - T_a)$$

式中 A_f 为翅片表面积。翅顶隔热近似下,翅片的效率为

$$\eta_f = \frac{\tanh(\beta L)}{L}\sqrt{\frac{\lambda A_c}{\alpha P'}} = \frac{\tanh(\beta L)}{\beta L} \tag{2-87}$$

(4) 三个参数之间的关系:整理上述公式可得三者之间的关系如下

$$R_f = \frac{1}{\alpha A_{sb}\varepsilon_f} = \frac{1}{\alpha A_f \eta_f} \tag{2-88a}$$

$$\varepsilon_f = \frac{A_f}{A_b}\eta_f \tag{2-88b}$$

讨论

由翅片功效表达式(2-86)和翅片效率表达式(2-87)可知:

(1) 翅片的功效与效率均正比于翅片材料的热导率,所以制作翅片时应选择高热导

率材料，如铝、铜；

(2) 要提高翅片的功效则在设计翅片时应使得翅片周长 P' 与翅片横截面积 A_c 之比尽可能大些，所以，通常的翅片应为薄而宽或半径小的针状；

(3) 翅片的功效与效率均反比于翅片的综合换热系数 α，这就意味着翅片散热器更适合于气态、自然对流的散热环境，强制对流或液态对流换热条件下翅片散热器的散热能力将打折扣。

例题 2-13

一矩形翅片散热器的翅片厚和宽分别为 2mm 和 40mm，长度为 30mm，材料为铝。设对流、辐射的综合换热系数为 $30\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$，环境温度为 25℃，翅基温度为 90℃。计算翅片的温度分布、散热流量以及热阻、功效、效率。

解 查表可知铝的热导率为 $210\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$，

翅片周长 $P=0.084\text{m}$

翅片截面积 $A_c=8\times10^{-5}\text{m}^2$

$$\beta=\sqrt{\frac{\alpha P'}{\lambda A_c}}=\sqrt{\frac{30\times0.084}{210\times8\ 10^{-5}}}\cdot\text{m}^{-1}=12.25\text{m}^{-1}$$

$$\beta L=12.25\times0.03=0.368$$

$$\sqrt{\alpha P'\lambda A_c}=0.206\text{W/K}$$

采用翅顶隔热近似，有

(1) 该翅片的温度分布为：

$$T(x)=T_a+(T_b-T_a)\frac{\cosh[\beta(L-x)]}{\cosh(\beta L)}$$
$$=25+60.84\cosh[12.25\times(0.03-x)]$$

(2) 该翅片的散热流量为

$$Q=\sqrt{\alpha P'\lambda A_c}(T_b-T_a)\tanh(\beta L)=4.71\text{W}$$

若考虑了该翅片的翅顶对流与辐射散热，则用 L_c 替代 L，根据公式(2-82)，得

$$L_c=L+\frac{A_c}{P'}\approx0.031\text{m}$$

代入公式计算可得

$$Q\approx4.85\text{W}$$

由此可见在此条件下，忽略翅片顶部的对流与辐射将对换热量产生约 3%的误差。

为计算该翅片的热阻、功效、效率，需要计算：

当翅基面积等于翅片横截面积，即 $A_b=A_c$ 时翅片表面积 $A_f=P'L=0.00252\text{m}^2$，在翅顶隔热近似下，可得

(1) 该翅片的效率为

$$\eta_f=\frac{\tanh(\beta L)}{\beta L}=0.957$$

(2) 该翅片的功效为

$$\varepsilon_f=\frac{A_f}{A_b}\eta_f=30.1$$

(3) 该翅片的热阻为

$$R_f = \frac{1}{\alpha A_f \eta_f} = 13.82\text{K/W}$$

3. 翅片散热器

为了获得更大散热功率，需要增加散热器的对流、辐射面积，实际使用的翅片散热器是由多个单翅片散热器并联而成，一种矩形平板的翅片散热器的结构示意图及尺寸如图 2-24 所示。设该散热器翅基一侧基板的温度为常数 T_b，环境温度为 T_a，总散热流量为 Q，定义该散热器的对流与辐射热阻为 R_{mf}：

$$R_{mf} = \frac{T_b - T_a}{Q} \tag{2-89}$$

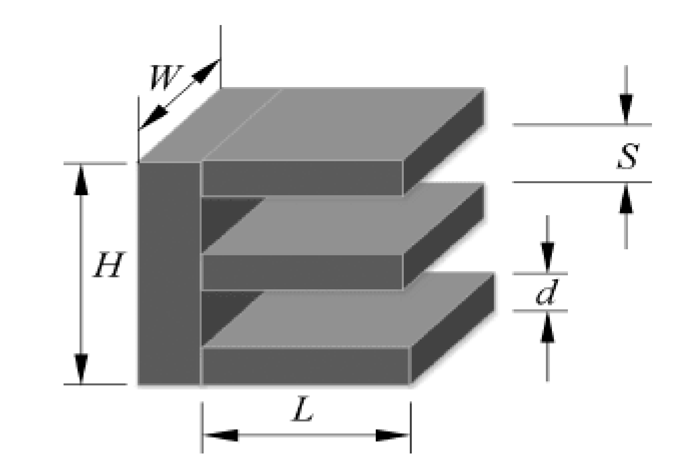


图 2-24　一种矩形平板的翅片散热器结构示意图及尺寸

此时，来自散热器基板的热流量将从基板传导至各个翅片，最终从散热器的基板、翅片表面通过对流、辐射换热散发至空气中。由此可知，R_{mf}等于所有翅片等效热阻与基板热阻的并联，即

$$\frac{1}{R_{mf}} = \frac{m}{R_f} + \frac{1}{R_{nf}} \tag{2-90}$$

式中，m 为散热器翅片的数目；R_f 为散热器翅片的热阻。由公式(2-88a)表示，R_{nf}为散热器基板的热阻，可以表示为

$$R_{nf} = \frac{1}{\alpha_{nf} A_{nf}} = \frac{1}{\alpha_{nf}(A_{sb} - mA_b)} \tag{2-91}$$

式中，α_{nf}为散热器基板翅基面的综合换热系数；A_{nf}为散热器基板翅基面有效表面积；A_{sb}为散热器基板翅基面实际表面积；A_b 为散热器翅基的截面积。

假设散热器基板、翅片的有效对流与辐射系数相等，均为 α，则散热器总热阻 R_{mf}可表示为

$$R_{mf} = \frac{1}{\left[1 - \frac{mA_f}{A_t}(1 - \eta_f)\right] A_t \alpha} \tag{2-92}$$

式中，A_f 为每个翅片的表面积；A_t 为散热器的总体散热面积，满足下式

$$A_t = mA_f + A_{nf} = mA_f + A_{sb} - mA_b \tag{2-93}$$

由此式和公式(2-81)可得翅片散热器的总散热量 Q 的表达式为

$$Q = \left[1 - \frac{mA_f}{A_t}(1 - \eta_f)\right] A_t \alpha (T_b - T_a) \tag{2-94}$$

与单翅片散热器的功效、效率定义一致，也可定义多翅片散热器的功效 ε_t 为多翅片散热器的散热量与无翅片基板散热量之比，代入前述相关公式可得如下结果：

$$\varepsilon_t = \left[1 - \frac{mA_f}{A_t}\left(1 - \varepsilon_f \frac{A_b}{A_f}\right)\right] \frac{A_t}{A_{sb}} \tag{2-95}$$

同样定义多翅片散热器的效率 η_t 为多翅片散热器实际散热量与最大散热量之比，多翅片散热器的最大散热量仍为翅片热导率为无穷大，即散热器翅片温度均等于翅基温度 T_b，为

$$Q_m = A_t \alpha (T_b - T_a) \tag{2-96}$$

按照定义可得

$$\eta_t = \left[1 - \frac{mA_f}{A_t}(1-\eta_f)\right] \tag{2-97}$$

同样多翅片散热器的上述三个参数之间满足下列关系：

$$R_{mf} = \frac{1}{\alpha A_{sb}\varepsilon_t} = \frac{1}{\alpha A_t \eta_t} \tag{2-98a}$$

$$\varepsilon_t = \frac{A_t}{A_{sb}}\eta_t \tag{2-98b}$$

因为热源安装在多翅片散热器基板的下部，热源的热流量传导至翅片并散发至空气中之前还必须经过 TIM 的散热器基板，如果热源尺寸远小于散热器基板的尺寸，还应考虑扩散热阻的影响。所以，更为精确的计算应在多翅片散热器总热阻中增加上述传导热阻分量。

此外，上述讨论时假设散热器基板、翅片外的等效对流和辐射系数相等，该假设对于单翅片散热器是成立的，但对于多翅片散热器则存在比较大的误差。主要原因在于翅片间的有限空间将会改变散热流体的流速等物理量。其次由于流体的不断吸热，流经翅片上游抵达下游的流体温度将提升，翅基与翅片外的温度为常数的假设不再成立。可以通过引入“热量热阻”来减小上述误差的影响。设流过散热器流体的质量为 m，流体的定压比热容为 c_p，则热量热阻 R_c 为

$$R_c = \frac{1}{2mc_p} \tag{2-99}$$

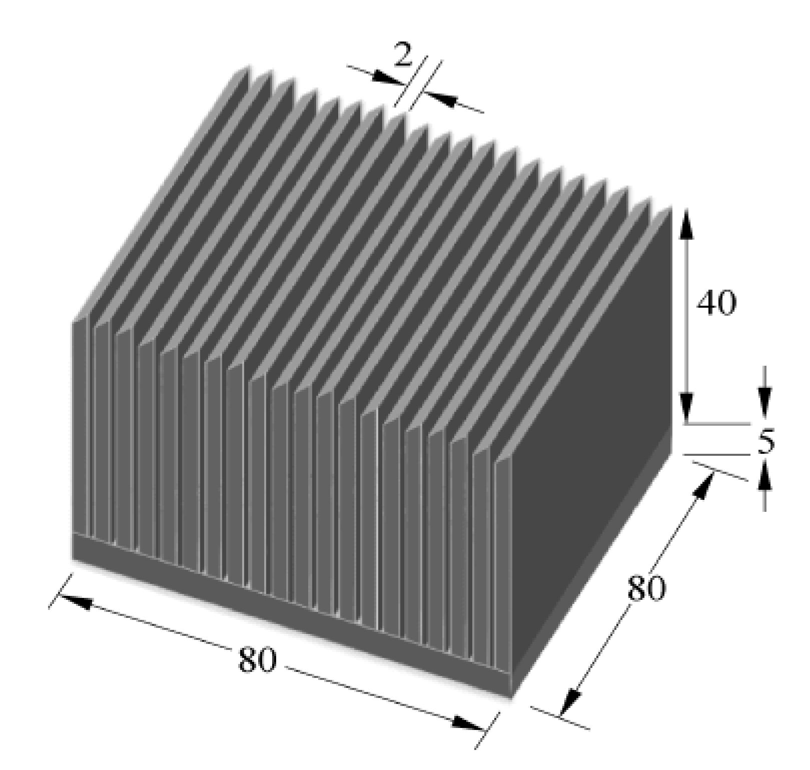


图 2-25　矩形平板翅片散热器（单位/mm）

例题 2-14

图 2-25 所示的铝制矩形平板散热器，有 20 个翅片，尺寸如图所示，设散热器表面的对流与辐射综合换热系数为 15W/(m²·K)，请计算该散热器的对流辐射热阻与基板传导热阻。

解　本题可以先求出单个翅片散热器的效率，再求出散热器总效率，根据总效率与散热器辐射对流热阻的关系即可求出该散热器的辐射对流热阻。考虑翅片顶部的对流与辐射效应，引入翅片的修正长度 L_c，为

$$L_c = L + \frac{A_c}{P'} = 0.04 + \frac{0.08 \times 0.002}{2 \times (0.08 + 0.002)}\text{m} \approx 0.041\text{m}$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\alpha P'}{\lambda A_c}} = \sqrt{\frac{15 \times 2 \times (0.08 + 0.002)}{0.08 \times 0.002}}\text{m}^{-1} = 8.56\text{m}^{-1}$$

则 $\beta L_c = 0.35$

由此可得该散热器的效率为 $\eta_f = \dfrac{\tanh(\beta L)}{\beta L} = \dfrac{\tanh(0.35)}{0.35} = 0.961$

翅片散热面积为 $A_f = P'L_c = 0.0067\text{m}^2$

散热器总散热面积为

$$A_t = mA_f + A_{sb} - mA_b = m(A_f - A_b) + A_{sb} = 0.1372\text{m}^2$$

求出该散热器的效率为

$$\eta_t = \left[1 - \frac{mA_f}{A_t}(1-\eta_f)\right] = 0.962$$

求出该散热器的对流辐射热阻,为

$$R_{mf} = \frac{1}{\alpha A_t \eta_t} = 0.505\text{K/W}$$

而散热器基板的传导热阻为

$$R_{sc} = \frac{d_b}{\lambda WH} = 0.004\text{K/W}$$

2.6 计算机模拟热设计简介

前述关于热传导、辐射与对流的讨论中均假设为在特定的简单条件(如热流密度均匀、表面温度均匀甚至周边环境温度不变等)下一维、稳态的物体温度分布及传热散热研究,得到了一些解析解。但在实际应用中,更多的是复杂的二维、三维热传导和热对流问题,热辐射不仅仅是单个面的,也可能由多个面同时辐射。例如笔记本电脑、电视机、LED 光源与灯具等,其外形复杂、内部空间拥挤,不能简单地简化为平板、沟槽,其材料表面的温度并非均匀,各处的热流密度也非均匀。这样系统的热管理问题,通过解 n 维傅里叶方程、能量守恒方程不可能得到解析解,只能借助计算机进行数值计算仿真模拟。其基本原理为将待研究系统划分为若干微小的单元,建立热相关的代数方程并通过适当的计算机算法求解出各个微小单元的温度,从而得到一组分立的温度点分布,当单元足够小时,则可得到近似的连续温度分布曲线,这就是有限元法在热分析中的应用。所谓有限元是指一个物体或系统被分解为多个相互联结、简单、独立的点组成的几何模型,由实际物理模型推导出来的平衡方程式被使用到每个点上,由此产生了一个方程组,这个方程组可以用线性代数的方法来求解。这些独立点的数量是有限的,因此称之为有限元。有限元是求解数理方程的一种数值计算方法,是解决工程实际问题的一种有力的数值计算工具。有限元法具有以下特点:

(1) 由于采用小区域划分,可以把各种复杂的结构划分成简单、正规的小区域,因此有限元模型可以适用于各种复杂的结构;

(2) 划分的区域足够小,边界条件可以近似相等,因此有限元模型可以适用于各种复杂边界条件的求解;

(3) 足够小的区域内,材料特性可以近似看成均匀的,因此有限元模型对复杂材料也能很好的求解。

由于这一方法的灵活、快速和有效性,使其迅速发展成为求解各种领域数理方程的一种通用的近似计算方法。随着计算机软件的广泛应用,有限元程序也迅速发展,提高了解题速度、方便了使用者。目前,它在许多科学领域和实际工程问题中都得到了广泛的应用。支持有限元的商用软件越来越多。

具有热分析能力的典型商用软件包括 ANSYS、FloEFD、Icepak、Flotherm 等,本书的下篇重点介绍 FloEFD,本节简单介绍一下 ANSYS。

ANSYS软件是集结构、流体、电场、磁场、声场分析为一体的大型通用有限元分析软件,由美国ANSYS公司开发,它能与多数CAD软件接口,实现数据的共享和交换,如Pro/Engineer、NASTRAN、Alogor、I-DEAS、AutoCAD等,是现代产品设计中的高级CAD工具之一。软件主要包括三个部分:前处理模块、分析计算模块和后处理模块。前处理模块提供了强大的实体建模及网格划分工具,可以方便地构造有限元模型。分析计算模块可进行线性分析、非线性分析和高度非线性分析,热分析是其中的一个分析计算模块,可处理热传递的三种基本类型:传导、对流和辐射,热传递的三种类型均可进行稳态和瞬态、线性和非线性分析;热分析还具有可以模拟材料固化和熔解过程的相变分析能力以及模拟热与结构应力之间的热-结构耦合分析能力。后处理模块可将计算结果以彩色等值线显示、梯度显示、矢量显示、粒子流迹显示、立体切片显示、透明及半透明显示(可看到结构内部)等图形方式显示出来,也可将计算结果以图表、曲线形式显示或输出。软件提供了100种以上的单元类型,用来模拟工程中的各种结构和材料。

后处理模块的处理过程包括两个部分:通用后处理模块POST1和时间历程后处理模块POST26。通过友好的用户界面,可以很容易获得求解过程的计算结果并对其进行显示。这些结果包括位移、温度、应力、应变、速度及热流等,输出形式可以有图形显示和数据列表两种。

通用后处理模块POST1对前面的分析结果能以图形形式显示和输出。计算结果(如应力)在模型上的变化情况可用等值线图表示,不同的等值线颜色,代表了不同的值(如应力值)。云图则用不同的颜色代表不同的数值区(如应力范围),清晰地反映了计算结果的区域分布情况。

时间历程响应后处理模块POST26用于检查在一个时间段或子步历程中的结果,这些结果能通过绘制曲线或列表查看。绘制一个或多个变量随时间或其他量变化的曲线,有助于形象化地表示分析结果。另外,POST26还可以进行曲线的代数运算。

ANSYS热模拟流程如下:

针对待分析系统与边界条件,采用ANSYS的参数化编程语言APDL建立系统的模型并进行热模拟分析,给出系统的温度分布及热平衡状况。

(1) 设定系统结构基本参数;

(2) 选择单元类型;

(3) 定义材料参数;

(4) 建立系统几何模型(注意:要充分利用模型的对称性,减少计算量);

(5) 赋材料属性;

(6) 划分网格(对于待重点分析、复杂、无规则部分进行延伸划分或映射划分,其余部分采用自由网格划分);

(7) 施加载荷并求解(1.建立系统各部分的对流和辐射组件,并施加对流和辐射的边界条件;2.设置辐射计算的参数,因为辐射计算为高度非线性,设置时间子步来提高分析的精度和收敛性);

(8) 查看温度分布云图(进入后处理,选择不同的材料单元,查看不同材料内的温度分布、总体及各组件的温度分布);

(9) 热平衡分析,计算模型的热输入和热输出(对流和辐射),借此可以看到各组件在

散热中的作用。

本书4.5.3节中介绍了使用ANSYS分析一种COB封装功率LED的例子。

2.7 几种先进的冷却技术

2.7.1 相变散热与热管

相变传热属于对流散热的范畴。物质有三种状态：气态、液态和固态。在同一温度下，物质从一种状态改变到另一种状态称之为相变，比如0℃时水结冰或冰融化为水、100℃时水蒸发为水蒸气。相变是物质分子的重新排列和分子热运动速度的改变过程，伴随着吸收或放出热量。相变传热是利用物质液态变气态所引起的能量吸收而达到降温目的，由于热量也由相变后的气态物质从高温区域传递至低温的散热器，所以，相变传热也应属于热对流范畴。

利用相变机理传热的典型器件为热管(heat pipe)，其结构及散热示意图见图2-26。由图可见，热管散热器为一柱形金属封闭体，内壁嵌有毛细管吸虹器件，左侧的蒸发段与热源相连，右侧的冷凝段与散热器相接，中段为隔热段。热源发出的热流传导至蒸发段，将此段内的液态工质(如水)加热，在液态转化成气态的过程中大量吸收热量，气态工质经过绝热段对流至冷凝段，气态工质转化成液态的同时释放出大量的热量传导至散热器，完成整个散热过程。

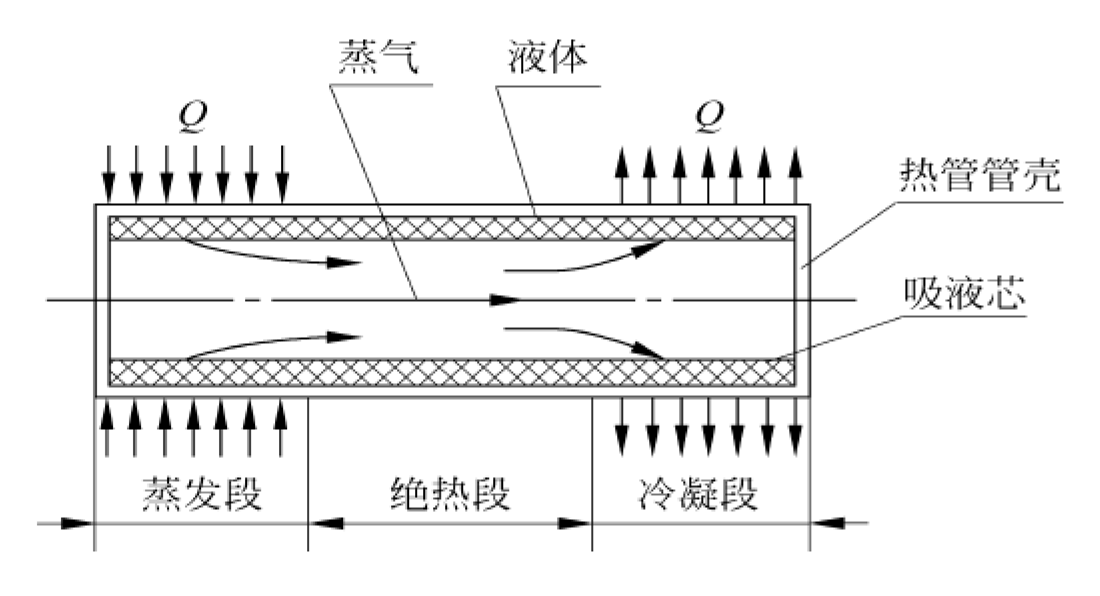


图2-26 热管结构及散热示意图

热管性能的评价参数主要有几何形状、工质及管壳材料、传热能力、散热能力。

(1) 几何形状：常见的为圆管形，这也是最为经济高效的结构，也有依据应用需求的其他形状热管，热管尺寸也应依据应用需求确定；

(2) 工质及管壳材料：工质是热管的工作液，也是热管导热的核心。对工质有如下要求：在工作温度范围内能够产生相变，蒸气压适中；良好的物理与化学稳定性，不易堵塞毛细管，不与管壁发生反应；浸润性优良，易于与管壁及毛细管均匀润湿；气化潜热大、热导率高、高表面张力、低黏度；管壳材料为金属或合金，应耐腐蚀、热导率高、易于制作安装吸液芯；

(3) 传热能力：表示最大可以传递的热流量，限制的因素有热管尺寸与形状、工质、毛细结构、工作温度等；

(4) 散热能力：其实质是热管的冷凝极限，与冷凝段的尺寸与散热器的性质相关。

热管的主要参数有最大散热功率、等效热导率等。热管本身是有多种材料组成的导热组件，等效热导率表征热管整体的热传导效果。

LED 光源常用的热管属于常温热管，即 0～250℃，最大散热功率与冷凝段散热器是否强制散热相关，一般散热功率在几十瓦以上，等效热导率可达 5000～10 000W/(m·K)，有效热阻小于 0.5K/W。图 2-27 为一 LED 路灯光源模组应用的热管。

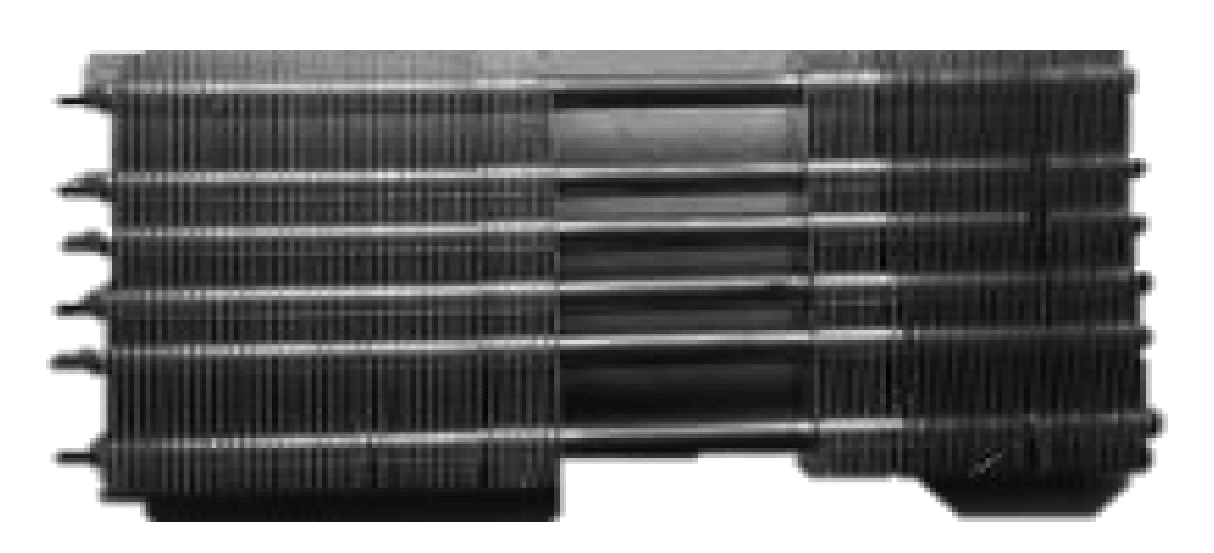


图 2-27 LED 路灯光源模组应用的热管照片

热管的寿命是有限的，影响热管寿命的因素有：工作液与管壁材料发生化学反应或电化学反应产生的不凝性气体在冷凝段凝固造成传热能力降低甚至失效；工作液体性质不稳定或与壳体材料发生化学反应造成的工作介质热物性恶化；管壳材料的腐蚀、溶解造成热管传热性能降低直至失效。

2.7.2 液体冷却与器件

液体冷却以水冷散热为主，水冷散热是指通过快速流动的水作为载体将热源产生的热量快速带至散热器的一种散热方式。图 2-28 所示为一种用于大功率 LED 光源的水微喷阵列制冷系统的结构示意图，由微型水泵、微喷阵列、散热器等组成。它的工作过程如下：微型泵将液态工质输入到微喷阵列入口，在微喷阵列微孔的作用下液态水呈雾状快速喷洒至 LED 器件的热沉进行热交换，将 LED 器件的热量快速转移至水中，并由之快速带至散热器，最终通过带电风扇的散热器将水所携带的热量散至空气。通过控制微喷阵列喷出速度和水的流速可以将 LED 的结温稳定在所需要的范围。

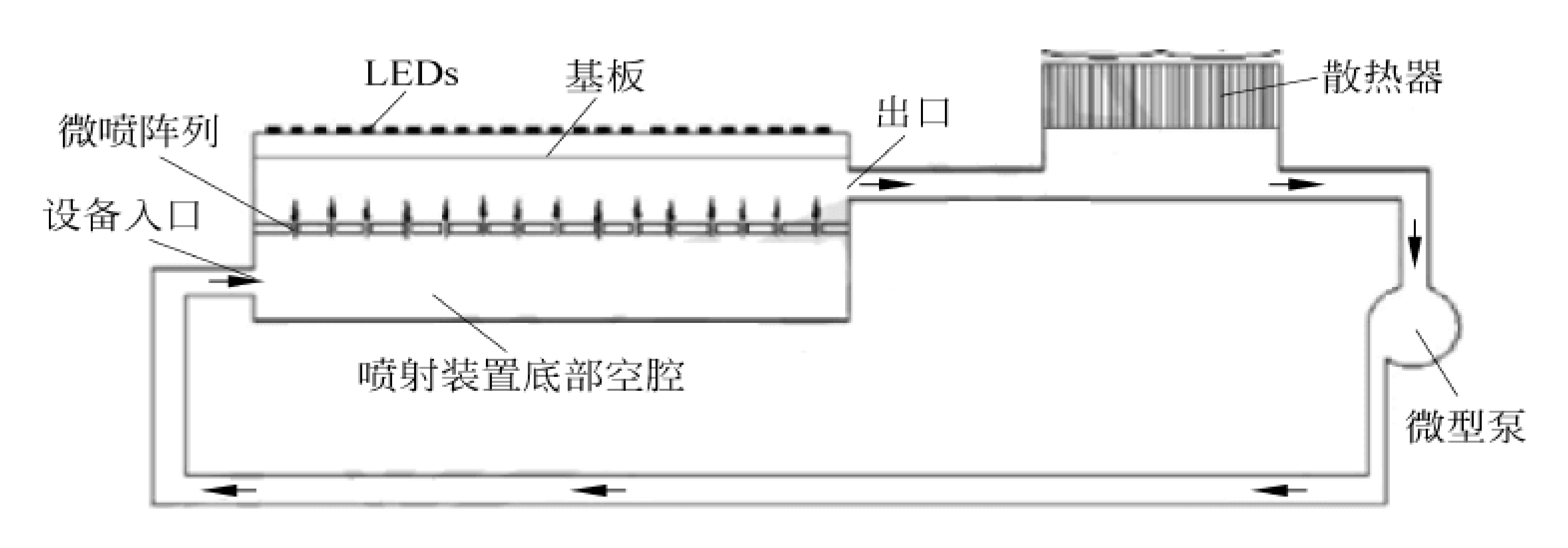


图 2-28 一种微喷阵列制冷系统的结构示意图

2.7.3 热电冷却与器件

热电冷却是指当直流电通过具有热电转换特性的导体或半导体组成的回路时在冷端具有制冷功能，半导体制冷是热电制冷中一种最常用的冷却方法。热电制冷器(thermoelectric cooler，TEC)是一种基于帕尔帖效应的有源导热组件。1834 年 J. A. C 帕尔帖发现给连接在一起的两种不同导体 A 和 B 施加直流电时，在导体 A 和 B 的连接节点处除焦耳热以外还会释放出一定的热量，当改变电流方向时，则在该连接节点处吸收一定的热量，吸收与放出的热量与施加的电流强度成正比，满足如下公式：

$$Q_P = \pi I \tag{2-100}$$

式中 π 为帕尔贴常数，单位为 V，π 为正值时表示吸热，反之为放热。由于吸放热是可逆的，所以 π 的绝对值相等。基本原理是两种材料存在能级差，当电子从较高能级材料运动至较低能级材料时，电子会释放与能级差相等的能量，并以热能的形式释放，反之亦然。实验发现半导体材料的帕尔帖系数远高于金属材料，所以，使用半导体材料制成的制冷器效率远远高于金属材料。

图 2-29 为单节半导体型 TEC 制冷工作原理示意图，单元正电极与 n 型半导体连接，负电极与 p 型半导体连接。p 型半导体与 n 型半导体互连面为制冷面，未互连端为散热端，工作时需要将散热端与散热器紧密连接。半导体型 TEC 的帕尔贴系数为

$$\pi = (\alpha_p - \alpha_n)T = \alpha_{pn} T \tag{2-101}$$

式中 α_p、α_n 分别为 p 型半导体和 n 型半导体的温差电压系数，前者为正值，后者为负值，T 为接触点的绝对温度。

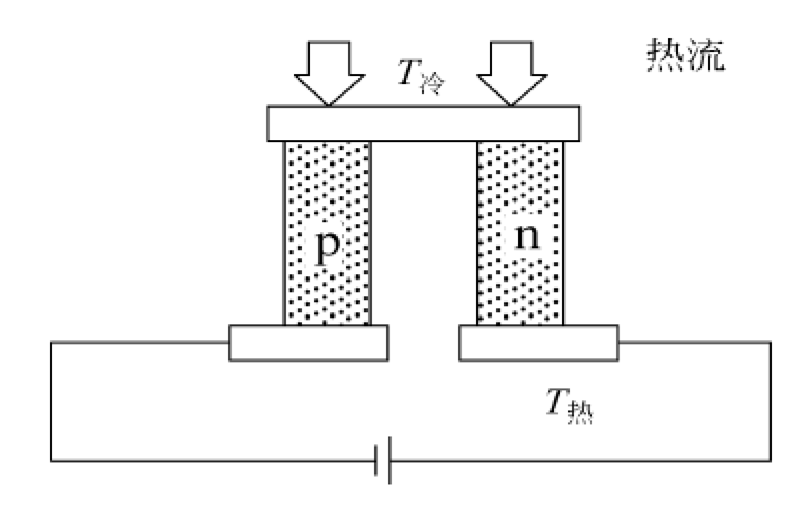


图 2-29 单节半导体型 TEC 的制冷工作原理示意图

由图 2-29 可知由冷端传递到热端的热流量包括构成 TEC 的各种材料电阻产生的焦耳热及传导热，表示为

$$Q_热 = \frac{1}{2}Q_J + Q_F = \frac{1}{2}I^2 r + K\Delta T \tag{2-102}$$

式中，K 为材料的热导系数等于热阻的倒数；r 为 TEC 材料电阻；ΔT 为 TEC 热端和冷端的温度差。由此可推得单个 pn 结的制冷量为

$$Q_冷 = Q_P - Q_热 = \frac{1}{2}Q_J + Q_F = \pi I - \frac{1}{2}I^2 r - K\Delta T \tag{2-103}$$

单节 TEC 可以获得的温度差为：

$$\Delta T = \frac{\alpha_{pn} I T_冷 - \frac{1}{2}I^2 r - Q_冷}{K} \tag{2-104}$$

上式对电流 I 求导，可得最大工作电流，如下式

$$I_{\Delta T_{\max}} = \frac{\alpha_{\mathrm{pn}}}{r} T_{冷} \tag{2-105}$$

上式表示在 TEC 冷端没有热量传入及其他条件不变时的工作电流，在此条件下 TEC 将获得最大的温差为

$$\Delta T_{最大} = \frac{\alpha_{\mathrm{pn}}^2}{2rK} T_{冷}^2 \tag{2-106}$$

同样，将 TEC 冷端输入热量对电流求导，带入最大工作电流也可得到 TEC 最大的制冷量为：

$$Q_{冷\mathrm{MAX}} = \frac{\alpha^2 T_{冷}^2}{2r} - K\Delta T \tag{2-107}$$

该式表示 TEC 工作在最大工作电流条件下 TEC 所具备的最大制冷量。

由于单节 TEC 的输入电功率为

$$P = VI = I^2 r + I\alpha_{\mathrm{pn}}\Delta T \tag{2-108}$$

定义 TEC 的制冷系数 γ 为制冷量与输入电功率之比，可得

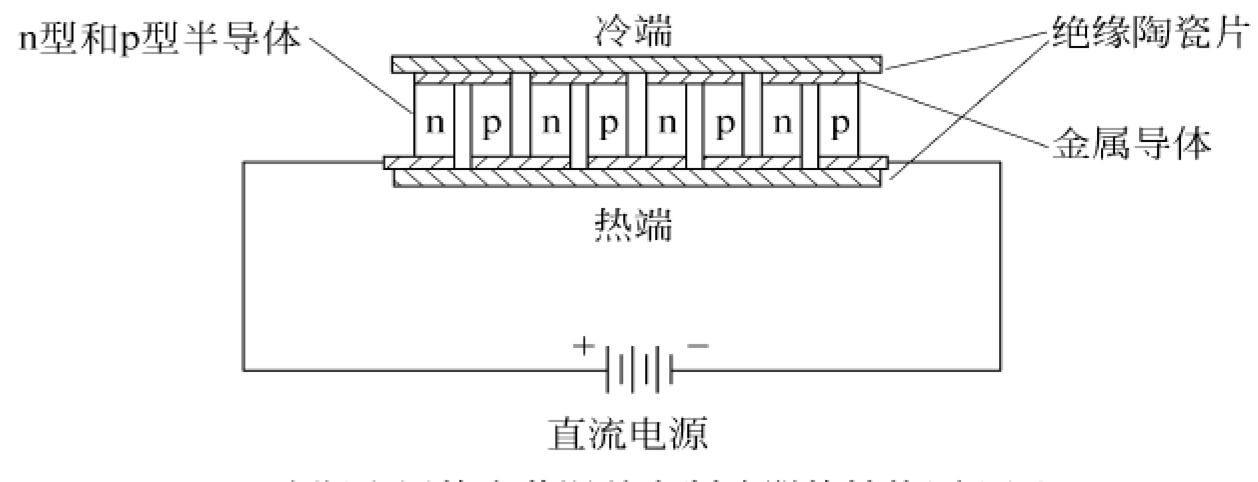
$$\gamma = \frac{\alpha_{\mathrm{pn}} I T_{冷} - \frac{1}{2} I^2 r - K\Delta T}{I^2 r + I\alpha_{\mathrm{pn}}\Delta T} \tag{2-109}$$

制冷系数是 TEC 的重要指标，表示将电能转换为制冷量的效率。将上式对电流微分，可以得到在最大制冷效率条件下的最大工作电流和最大制冷效率，分别为

$$I_{\mathrm{MAX}} = \frac{\alpha_{\mathrm{pn}}\Delta T}{r(\sqrt{1+0.5(T_{冷} - T_{热})} - 1)} \tag{2-110}$$

$$\gamma_{\mathrm{MAX}} = \frac{T_{冷}\sqrt{1+0.5(T_{冷} + T_{热})} - T_{热}}{\Delta T\sqrt{1+0.5(T_{冷} + T_{热})} + 1} \tag{2-111}$$

为了获得更大的制冷量，可将多个单节 TEC 串联或并联，也可以串并联混合连接。图 2-30 为一实际应用的多节温差电制冷器的原理图和照片。由图 2-30 可知，实际产品是将多组单节 TEC 焊接组装在两片陶瓷片之间，陶瓷片多采用三氧化二铝陶瓷基板，如有特殊需求可以在陶瓷基板制冷面和散热面上制作金属层。需要注意的是 TEC 与陶瓷基板的焊接多采用低温焊料，因此，在使用中需要特别注意的是热源与 TEC、散热器与 TEC 安装时不宜长时间使用过高的安装温度。




(a) 实际应用的多节温差电制冷器的结构原理图

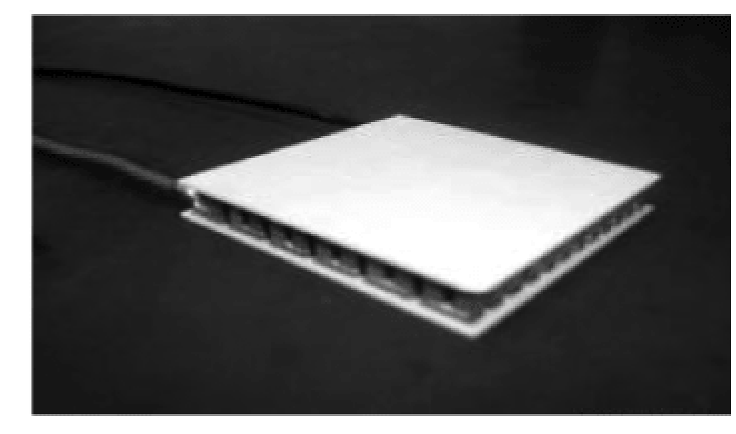

(b) 一种实际的TEC照片

图 2-30　实际应用的多节温差电制冷器的结构原理图和一种实际的 TEC 照片

半导体制冷器的参数包括最大电流、最大电压、最大制冷量、最大温差。其他还包括节数、尺寸、电阻、重量等，一组典型的 TEC 参数如表 2-5 所示。

表 2-5　典型的 TEC 参数

型　号 TYPE NUMBER	电堆数	最大工作电流/A	最大工作电压/V	最大产冷量/W	最大温差 ΔT_{max} $Q_c=0$/℃	外形尺寸/mm			电阻/Ω	重量/g
				温度 $T_h=27$℃		l	m	h		
TEC1-00703T125	7	3	0.8	1.6	69	10	10	5.4	0.21	4
TEC1-00704T125		4		2.1	69	10	10	4.7	0.16	3
TEC1-00705T125		5		2.6	69	10	10	4.2	0.13	3
TEC1-00706T125		6		3.1	67	10	10	3.9	0.11	3
TEC1-00707T125		7		3.6	66	10	10	3.7	0.09	3
TEC1-00710T125		10		5.2	64	10	10	3.3	0.06	3
TEC1-00712T125		12		6.2	62	10	10	3.2	0.05	3
TEC1-01703T125		3		3.8	69	15	15	5.4	0.52	6
TEC1-01704T125		4		5.0	69	15	15	4.7	0.39	5

半导体制冷器的尺寸较小，一般的 TEC 面积为 cm^2 量级，厚度 mm 量级，重量仅为几克或几十克。德国 Micropelt 公司生产了一种世界上尺寸最小的 TEC，其制冷面积仅为 $1mm^2$，可以用于微小封装中半导体激光器的散热。

半导体制冷器具有如下优点：

(1) 无机械传动：工作时无噪音、无液体及气体工质，故不污染环境；

(2) 制冷参数不受空间方向以及重力影响，在大的机械过载条件下，能够正常地工作；

(3) 制冷量可调节，通过调整工作电流即可方便地调节制冷量；

(4) 制冷与制热可切换，通过变换电源电极，可方便地使 TEC 从制冷状态转变为制热状态；

(5) 制冷的响应速度快；

(6) 使用寿命长；

(7) 易于实现自动控制。

由于红外探测器、半导体激光器、半导体发光二极管、光电倍增管等光电器件均对温度极为敏感，为了获得稳定的性能及更长的寿命、更低的故障率，需要使用 TEC 对这些器件制冷并将结温控制在要求的范围内。此外，TEC 在需要小面积、精密控制、准确调节温度的现代农业实验场所以及医疗、家用领域也得到了广泛的应用。

2.7.4　电流体流动散热

电流体流动散热的基本原理是在外电场作用下带电体(带电分子或原子，即带电离子)快速运动产生离子风(ionic wind)，同时将热量从高温区移至低温区，从而达到散热的

目的,国外称之为电流体固态风扇(electro-areo dynamic solid-state fan,EADSSF)。原理结构如图2-31所示,图中阳极为一丝状金属电极,也可为其他尖锐状金属电极,阴极为一平板状金属电极。加电后丝状电极附近的高电场强度将使其附近的部分空气电离成为带电离子,该类离子将在电场力的作用下向阴极移动形成离子风,所以也称图中的尖锐电极为电晕极,平板电极为集电极。与此同时,该类离子不断撞击未电离的空气分子,将部分能量转移,最终形成一股由电晕极流向集电极的气流团,产生强制对流现象。

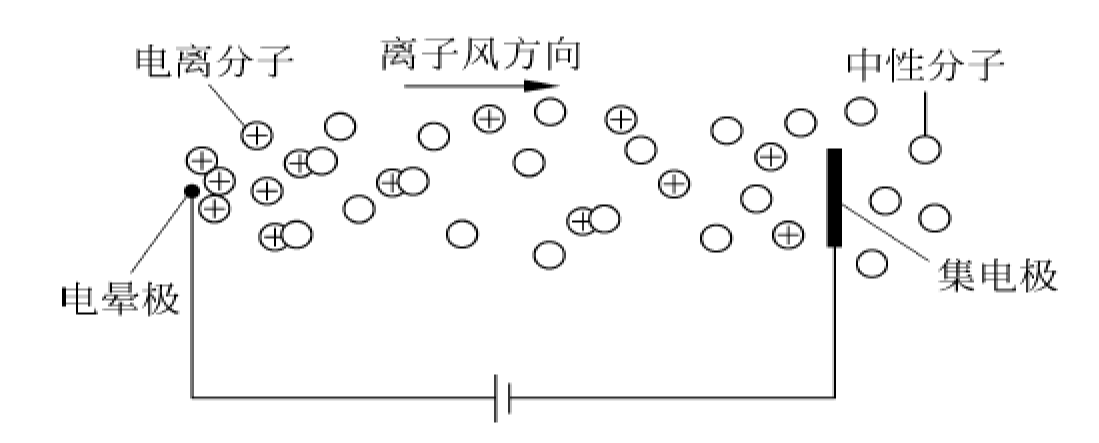


图2-31 电流体流动散热机理

可以将EADSSF与翅片散热器结合用于电子设备的散热,如笔记本电脑等,用以替代传统的常规风扇。与常规风扇相比,EADSSF无机械噪声、可以适应系统的形状设计,实验发现可使低速层流的局部换热系数增加2倍以上,近期的研究重点在降低运行电压、提高可靠性和减小尺寸方面。

思考题

1. 热的物理实质是什么?

2. 物体温度升高的实质及原因是什么?

3. 什么是比热容?定压比热容和定容比热容有何区别?

4. 什么是理想气体?描述说明理想气体定律?

5. 什么是热力学第一定律?

6. 固定质量的能量平衡方程和固定体积的能量平衡方程的异同点是什么?分别用于哪些热交换场合?

7. 什么是散热,主要方式有哪些?

8. 什么是热传导、热对流和热辐射?

9. 试说明导热、对流散热及辐射散热三种传递方式之间的联系与区别。

10. 试说明热量、热流量、热流密度之间的联系与区别。

11. 导热系数、对流系数及辐射率的单位是什么?哪些是物性参数?哪些与过程有关?

12. "空气是LED封装中的大敌"这种说法对否?试用导热系数解释。

13. 用一只手握住盛有热水的杯子,另一只手用筷子快速搅拌热水,握杯子的手会更快速地感到热。试分析其原因。

14. 什么是热阻?热阻有哪些类型?

15. 什么是热阻串并联叠加原则,它在什么前提下成立?以固体中的导热为例,试讨论有哪些情况可能使热量传递方向上不同截面的热流量不相等。

16. 试推导出热阻的串联和并联公式,并说明适用条件。

17. 采用平板法测量液体的导热系数，将液体装入一容器，该容器上下面为很薄的高导热金属材料，四周为近乎“隔热”的玻璃。试分析上下表面不同冷热状态时热量交换的方式有何不同？如果要通过实验来测定流体的导热系数应该采用哪种状态？

18. 为何说热管的散热过程属于热对流范畴？说明其工作原理。

19. 什么是自然对流的“烟筒”效应，试解释提高对流系数的原因？在散热器设计中如何利用该效应提高散热能力？

20. 什么是强制对流？

21. 什么是提高散热器热辐射散热能力、减小辐射热阻的主要方法？

22. 什么是扩散热阻？在什么情况下不能忽略扩散热阻的影响？

23. 试提出一种测量热阻的方法。

24. PCB电路板的热阻是各向同性的吗？如何减小它的热阻？

25. 翅片散热器的结构是什么？为何散热能力强？

26. 翅片散热器热阻、功效与效率的定义是什么？它们之间有什么关系？

27. 试说明液体冷却的原理。

28. 试说明热电冷却的原理。

29. 比较热管、液体冷却、热电冷却的优缺点，并分析说明各自适应的场合。

习题

1. 输入一平板金属材料的热功率为1W，该平板的面积为$10cm^2$，厚度10cm，热平衡后该热板两端的温差为40℃，请判断一下该平板是何种金属。

2. 一根电热管的加热功率为100W，管壁平均温度为150℃，环境温度为20℃，管子外径14mm，加热段长300mm。如果全部热量通过对流散热传递给空气，试求此时的对流系数，并判断应该采用何种对流方式。

3. 一LED灯具的外表面平均温度为50℃，环境温度为20℃，灯具材料表面的发射率为0.2，求其辐射散热功率密度。当在其表面喷涂一种发射率为0.9的涂料后其辐射散热功率密度为多少？

4. 一长度为l的正方形散热器，其对流散热功率为P_1，为了提高散热功率在其上方切削出多组等厚度、等间隔翅片，在对流系数、气固表面温差不变的前提下，当散热功率为其n倍时，需要切削出几个翅片？假设热源放在散热器底部，翅片散热器的底部面积忽略不计。

5. 一底面积为$1cm^2$的LED芯片直接键合(紧密接触并固定)到没有抛光的氧化铝陶瓷基板上，键合面积为芯片面积的1%，平均接触点高度20μm。测得芯片结温与陶瓷基板温度之差$\Delta T=10$℃。空气的热导率$\lambda_{air}=0.026$W/(m·K)，氧化铝陶瓷的热导率$\lambda_{ceramic}=0.026$W/(m·K)，室温$T_a=25$℃。有三种贴片胶水可以选择，A胶水的热导率$\lambda_a=0.11$W/(m·K)(300￥/kg)，B胶水的热导率$\lambda_b=0.55$W/(m·K)(800￥/kg)，C胶水的热导率$\lambda_c=1.1$W/(m·K)(400￥/kg)。请画出该系统的等效热阻结构图并求出键合条件下总的接触热阻、LED芯片产生的热流量Q。设计一套封装方案，在尽量节约成本的前提下保持LED结温不高于35℃。

第3章 LED芯片与热性能

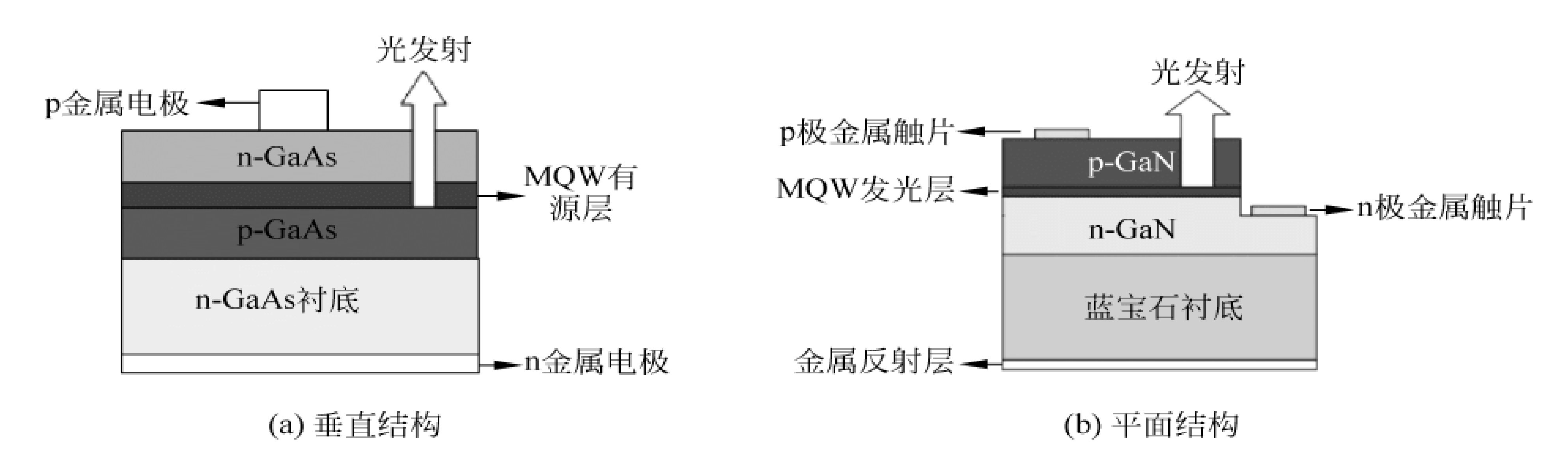
以发光二极管(light emitting diode,LED)为核心的新一代半导体照明(semiconductor lighting,也称为 solid state lighting,SSL,即固态照明)是对传统照明体系的一场革命性的颠覆,作为一种安全、健康的"绿色光源",节能环保效果非常明显。2007 年美国《自然》杂志发表文章称:照明占全球能源消耗的 8.9%、电力消耗的 19%,对 GDP 的贡献率仅是 0.63%。如果采用半导体照明技术,有望使 2050 年的照明用电量仍维持 2007 年的水平,而对 GDP 的贡献率将上升至 1.63%。不仅如此,拥有无限潜能的半导体照明技术还将在人类健康、信息、农业、航空、航天等领域发挥重要的作用,其数字化的特性也是未来智能及物联网时代的技术支撑之一,它将引起人类生产、生活方式的巨大变化,其发展前景毋庸置疑。

LED 是典型的电致发光光源,是半导体照明的核心。目前,蓝光 LED+黄色荧光粉合成白光光源的发光效率已经超过 300lm/W(2015 年实验室水平),显色指数达到 80 以上。但是,作为照明光源 LED 仍需彻底解决以下问题:光、电、色参数随电流、温度的改变而变化;即使发光效率达到 300lm/W,其外量子效率也仅在 50%左右,即仍有 50%左右的电能转化为无用的热量,若考虑整体灯具,则还需要考虑电源效率、灯具效率等因素,则发热的比例会更大。这些热量将引起 LED 结温的升高,不仅影响半导体照明的性能参数与质量,还将大幅降低 LED 的寿命,研究表明结温每升高 10 度,LED 寿命将减少到 50%。因此,LED 热设计与热管理是长期的、重要的工作。

3.1 LED 基本原理

典型的 LED 芯片分为垂直结构和平面结构,如图 3-1(a)和(b)所示。由多层不同性质的半导体材料相叠、并分别在最顶层 p 型层和相应的 n 型层上分别制作正负金属电极。半导体材料从下往上依次包括衬底层、过渡层、发光层(有源层)、顶层。

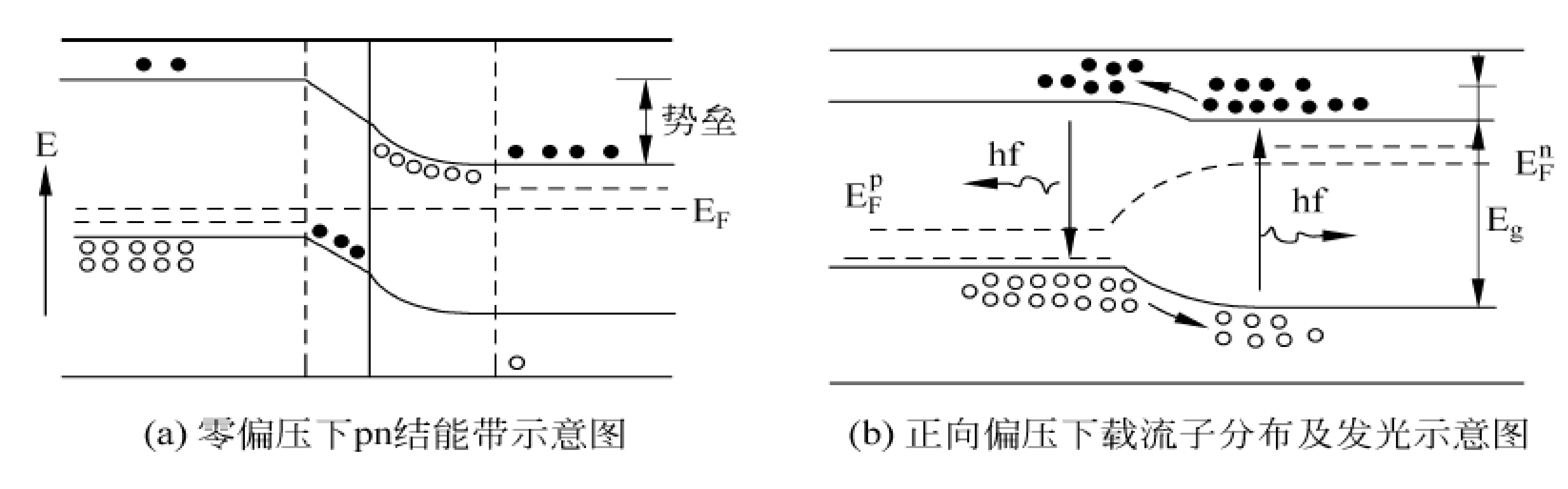
其中,发光层的核心是 pn 结,当给 pn 结加正向偏置时,n 区的电子克服 pn 结势垒扩散到 p 区, p 区的空穴克服 pn 结势垒扩散到 n 区,形成正向注入的扩散电流。同时,在耗尽区两侧分别形成过剩电



(a) 垂直结构　　(b) 平面结构

图 3-1　LED 芯片垂直结构和平面结构

子和过剩空穴(简称过剩载流子)分布。在扩散过程中,电子与空穴碰撞发生复合,即电子从导带跃迁至价带的同时释放大小等同于禁带宽度的能量,同时,跃迁过程必须保证能量守恒和电子动量守恒,即 $h\upsilon=Eg,\Delta k=0$。复合包括辐射复合和非辐射复合,前者是指电子从导带跃迁至价带与空穴复合的同时释放大小等同于禁带宽度的光子,后者是指电子从导带跃迁至价带与空穴复合的同时释放大小等同于禁带宽度的若干个声子。pn 结及发光过程见图 3-2(b)。使用内量子效率 η_i 表征注入到发光区内的电子-空穴对辐射复合发射光子的程度,所以,$1-\eta_i$ 表征 LED 发热的程度。此外,半导体材料本身均具有一定的电阻率,金属电极与半导体材料之间形成欧姆接触时也会产生接触电阻,封装芯片至管壳中也将产生一定的接触电阻。正向偏置的注入电流流经这些电阻产生的焦耳热与非辐射复合的热量一起提高了 LED 中 pn 结区域(有源区)的温度(称为 LED 的结温),从而影响 LED 的性能。为保证 LED 有足够的寿命裕量,正常工作时的结温一般不应超过 110℃。



(a) 零偏压下pn结能带示意图　　(b) 正向偏压下载流子分布及发光示意图

图 3-2　零偏压下 pn 结能带示意图与正向偏压下载流子分布及发光示意图

前面讨论的 pn 结为同质结。由于同质结 LED 有源区中维持不了很高的载流子浓度,即使选择了辐射复合率很高的直接带隙半导体材料,其发光效率仍很低。目前,商用 LED 主要采用双异质结结构(double hetero-structure,DH)和量子阱结构(quantum well,QW)作为有源区。

3.1.1　双异质结结构 LED 原理

典型的双异质结(double heterojunction,DH)LED 器件结构如图 3-3 所示,在 n 型衬底(基板)上外延生长 n 型过渡层以便减少 DH 层的缺陷,过渡层上依次生长宽禁带的

N 型层(下限制层)、窄禁带的低掺杂 p 型层(发光区、有源区)、宽禁带的 P 型层(上限制层),以上三层构成 NpP 双异质结结构,该结构类似于"三明治",发光的区域仅限于夹在两个宽禁带材料中央很薄的窄禁带材料中。再在 P 型层之上生长高掺杂的顶层(cap layer,称为帽层),该层的作用是为金属电极与半导体材料间提供低电阻率及高可靠性的欧姆接触以及控制通过有源区的电流分布。最后分别在 p 型顶层上部和 N 型衬底下部制作正负金属电极。

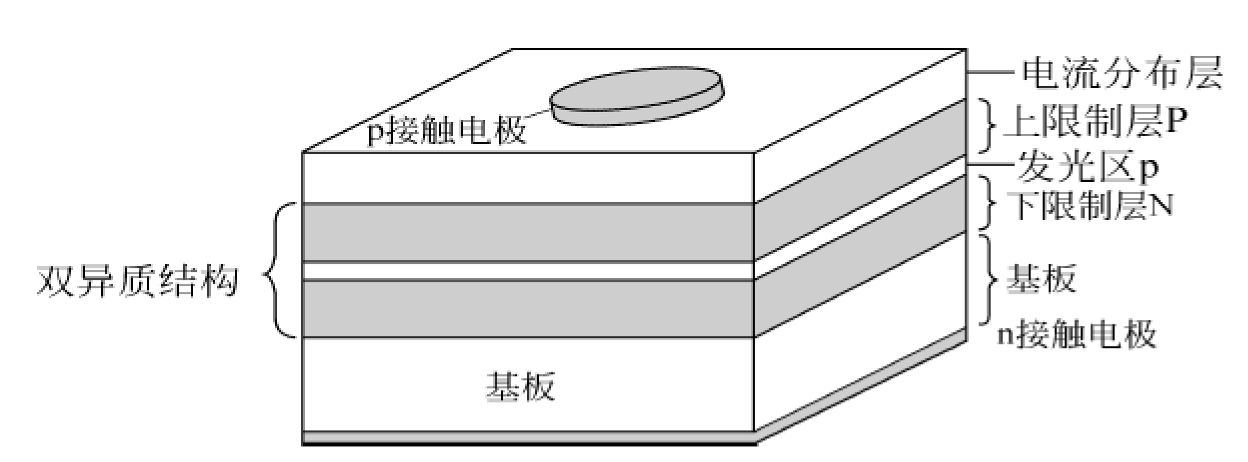


图 3-3　一种 DH-LED 器件结构示意图

以图 3-4 所示的 AlGaAs/GaAs 系的红橙光 DH-LED 为例。图 3-4(a)为 DH 结构示意图,图 3-4(b)为未加偏压时的热平衡态下的 DH 能带图,此时,三种材料具有统一的费米能级 E_F。为其加上正向偏压后,热平衡态被打破,三种材料的准费米能级分离,Np 结的电子有效势垒降低,N 区的电子扩散进入至 p 型层,使得 Np 结 p 区内的过剩电子浓度很高。但是,此时空穴的有效势垒仍然很高,继续阻止 p 区的空穴扩散进入到 N 区,即 p 型层的空穴浓度几乎没有减少。扩散进入 p 型层的过剩电子将向 P 区方向继续扩散,由于 p 型层很薄,许多过剩电子将会扩散至 pP 结位置。由于 pP 结的电子有效势垒很高,将阻止过剩电子的继续扩散,维持了 p 区过剩电子的高浓度状态。此外,由于 pN 结势垒一直阻止 p 区空穴的扩散,p 区的空穴浓度也将维持高浓度状态。p 区中电子与空穴发生辐射复合而发光的过程也遵从能量守恒定律和动量守恒定律。图 3-5 为正向偏压下 DH-LED 结区过剩载流子分布示意图,与图 3-2 所示的同质结 LED 相比,DH-LED 有源区中过剩电子与空穴浓度均很高,有利于提升内量子效率。

与同质结 LED 相比,DH-LED 具有以下优势:

(1) 在超注入、高的电子/空穴注入比及高的 pP 结电子有效势垒综合作用下,能在较小的正向偏压作用(即较小的注入电流密度)下就可维持有源区过剩载流子的高浓度状态,从而保证了内量子效率远高于同质结;

(2) 发光区集中在 p 型层,且其厚度远低于电子的扩散长度,光子再吸收的几率低于同质结;

(3) P 区与 N 区的禁带宽度均大于发光的 p 区,故 p 区发出的光子进入到 N、P 两区后满足透明条件,可以无吸收的传输。由于实际 LED 中 P、N 两区的体积远远大于 p 区,将明显地提高 LED 的发光效率。

当然,DH 结构也有弱点,如 p 型层的折射率高于 N、P 两层,形成了光波导效应,仅有反射角小于全反射角的光子才可以折射至 N、P 两区,这将引起出光效率(也叫光萃取效率)的降低,从而导致 DH-LED 发光效率的降低。

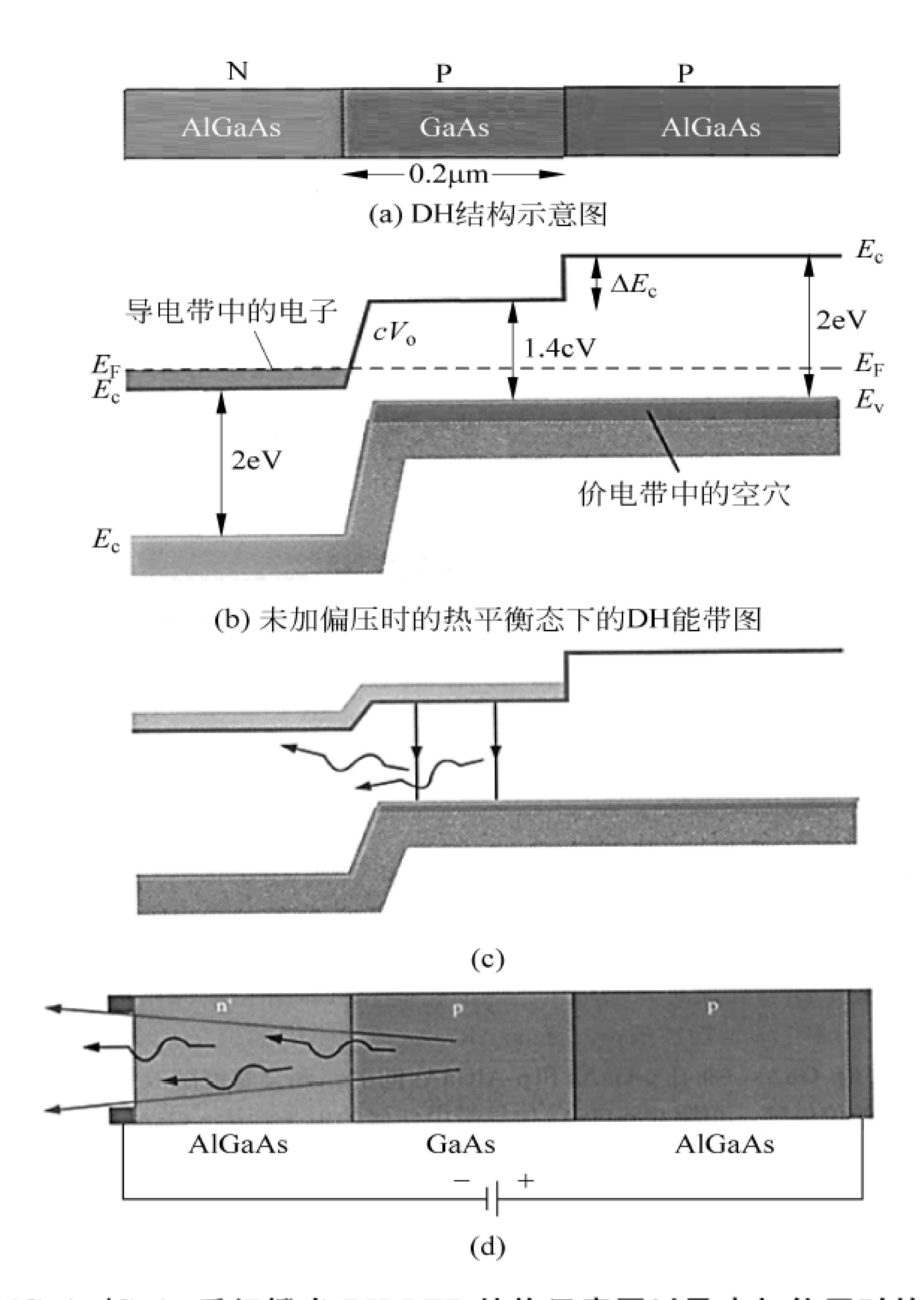


图 3-4　AlGaAs/GaAs 系红橙光 DH-LED 结构示意图以及未加偏压时的 DH 能带图

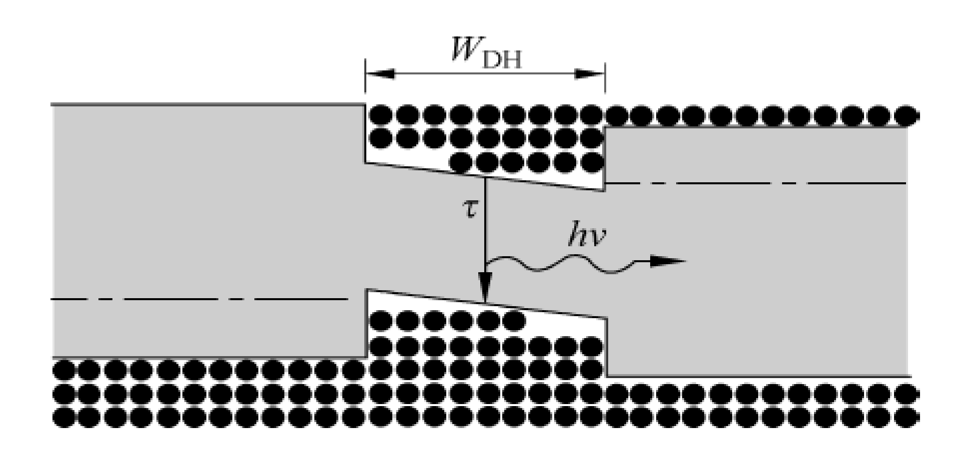


图 3-5　正向偏压下 DH-LED 结区过剩载流子分布示意图

3.1.2　量子阱结构 LED 原理

一种量子阱 LED 的结构如图 3-6 所示，在图形化的 n 型蓝宝石衬底上低温外延生长 n 型 GaN 过渡层，该层的作用是为其上生长的半导体材料提供低缺陷的高质量晶体结构，再在其上生长量子阱诸层。量子阱由势阱和势垒共同组成，如图 3-7 所示。称仅生长

一对势阱和势垒的称单量子阱(single quantum well,SQW),生长多对且势垒厚度远大于势阱厚度的称多量子阱(multi-quantum well,简称为 MQW)。若势垒厚度与势阱厚度相似,则称之为超晶格结构。再在 QW 层上生长顶层,其作用与 DH 结构相同,金属电极的结构与前述 LED 一致。发光区域集中在 QW 层区。

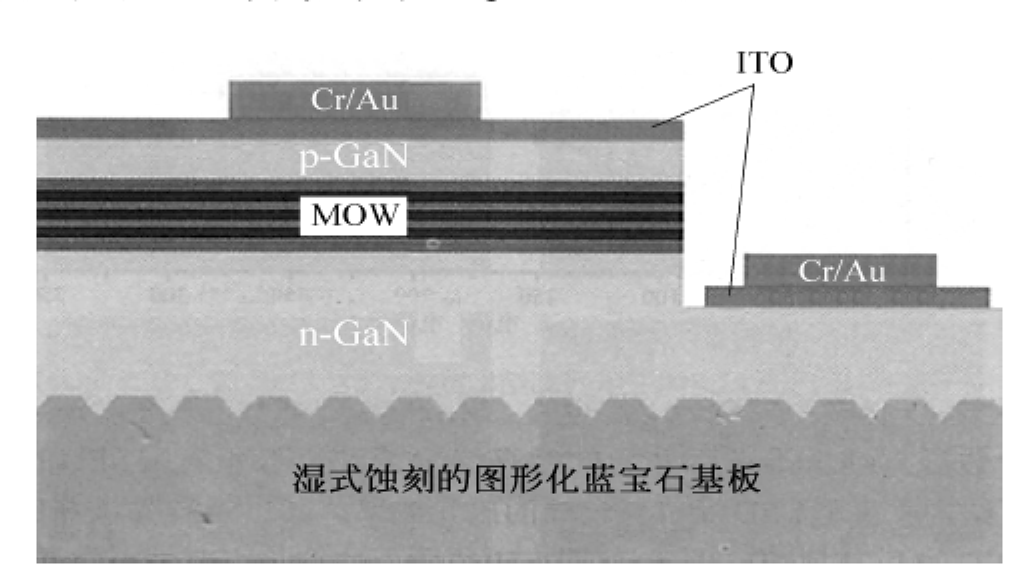


图 3-6　常用的蓝绿光多量子阱 LED 的结构示意图

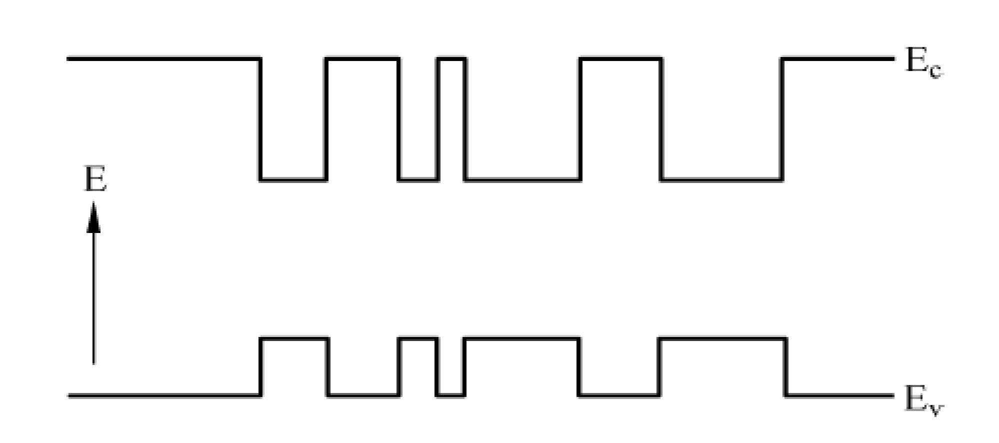


图 3-7　多量子阱结构与能带示意图

量子阱结构 LED 是在 DH 结构基础之上,得益于诸如 MOCVD(金属氯化物化学气相淀积)及 MBE(分子束外延)等精密外延技术的进步而发展起来的新型发光器件结构。SQW 结构与 DH 结构相同,仅当 p 型层的厚度小于德布洛意(De Broglie)波长 λ_d($\lambda_d=h/p$,此处,h 为普朗克常数,p 为电子的动量,通常 λ_d 约为几十纳米量级)时,导带与价带的能带不再连续,分别分裂成如图 3-8(a)所示的系列分离能级,态密度函数也遵从如图 3-8(b)所示的台阶函数分布,过剩电子将主要分布在导带的 E_{1C} 能级以上,过剩空穴主要分布在价带的重空穴能级 E_{1hh} 和轻空穴能级 E_{1lh} 以下,载流子按照能量的分布更为集中,如图 3-8(c)所示。势阱中的电子与空穴碰撞发生辐射复合而发光,量子阱中电子从导带

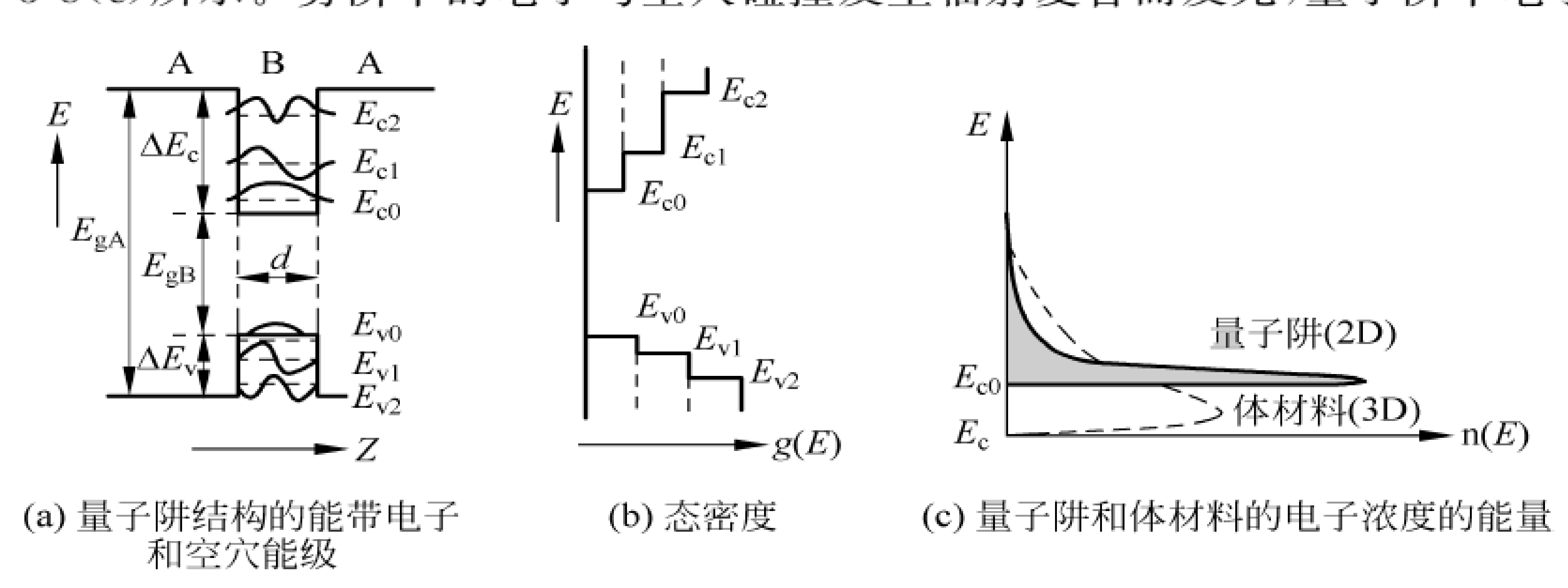


图 3-8　量子阱结构的能带电子和空穴能级和态密度以及量子阱和体材料的电子浓度的能量分布

电子能级到价带空穴能级的跃迁选择定则为 $\Delta n=0$，即居于第一电子能级的电子只能跃迁到第一重空穴能级或第一轻空穴能级上，第二电子能级的电子只能跃迁到第二重空穴能级或第二轻空穴能级上，依此类推。这是动量守恒定律在 QW 结构中的表现形式，如图 3-9 所示。

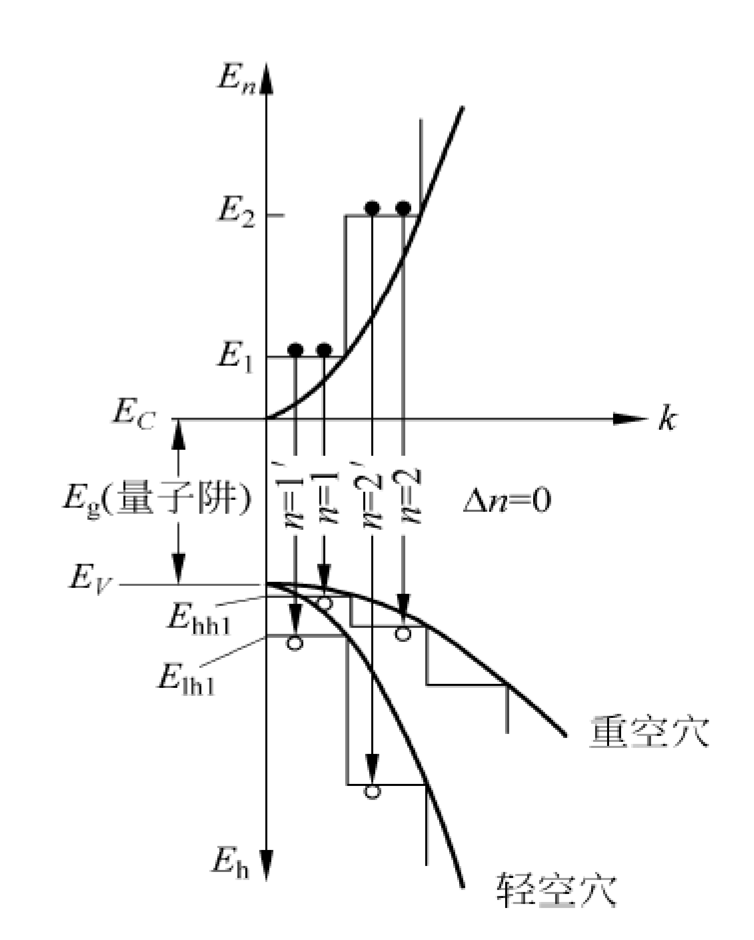


图 3-9　量子阱中电子跃迁选择定则

与 DH-LED 相比，QW-LED 更具优势，主要体现在：

（1）势阱厚度更薄，较低注入电流密度下即可获得高的载流子浓度，内量子效率更高，光子吸收更小；

（2）分立能级结构使注入效率更高、辐射光子的能量更为集中、光谱更纯；

（3）采用 MQW 结构可以使 LED 获得更大的输出光通量。

目前，QW-LED 最大的问题是发光效率随注入电流的增大而减小，除大注入引起的“载流子溢流”(overflow of carriers)、俄歇复合外，其他物理机理尚未完全清楚。研究发现蓝宝石衬底 c-plane 方向外延生长会在晶体内产生自发极化与压电极化，极化电场将使 QW 能带倾斜，致使量子阱中电子波函数与空穴波函数在空间上分离，从而减少了发生复合的几率。还发现由于电子与空穴的迁移率不同，造成 MQW 各阱中的载流子浓度不均匀匹配，降低了发光效率。此外，随着注入电流的增加，俄歇复合快速增加，也将降低发光效率。该领域的研究还在不断深入，比如，蓝宝石图形衬底外延、无极化方向外延及量子阱中生长高能量的电子势垒、渐变量子阱等。此外，新型衬底材料的出现将使得蓝绿光 LED 的同质外延成为可能。这些技术均可大幅提升 LED 的内量子效率。

3.2　芯片

3.2.1　LED 衬底材料与芯片结构

从结构上 LED 芯片可分为垂直结构和平面结构，如图 3-1 所示。上述芯片均为正装结构，即封装时直接将芯片衬底贴装在支架或管壳电极处，p 型电极通过键合金丝与管壳电气连接。垂直结构工艺简单，电极位于芯片上下端面，发光体积大，容易获得均匀的电流分布，p 电极遮光效应低。而平面结构工艺复杂，需要在 p 面挖槽至 n 型过渡层，然后分别在顶部的 p 型层和 n 型过渡层制作正负电极。n 型电极减小了发光区体积，且这种电极结构也很难实现均匀的电流分布。

常用的 LED 衬底材料包括：蓝宝石(Al_2O_3)、碳化硅(SiC)、硅(Si)、砷化镓(GaAs)等。前三种材料为常用的蓝光、绿光 LED 的衬底，在其上生长辐射蓝、绿光的 AlGaN 系列有源层。砷化镓为常用的红、橙、黄光 LED 的衬底，在其上生长 AlGaAs、AlGaAsP 系列有源层。常用 LED 衬底材料性能如表 3-1 所示。

由于 Al_2O_3 晶体生长技术成熟、单晶质量高、理化性能稳定、机械强度高、成本低，蓝宝石是最常用的蓝光、绿光 LED 的衬底。但是，蓝宝石也存在一些问题，例如：

（1）由于晶格热失配，难于直接生长高质量外延层；

（2）由于绝缘体无法制作简单的垂直结构 LED，只能制作平面结构 LED，造成有效发光面积的减少、工艺复杂化；

（3）难于高浓度 p 型掺杂，很难制作出小的有效电极面积、低电阻的金属电极；

（4）蓝宝石的热导率很低，若将 LED 芯片的衬底直接粘接到管壳（正装）则从发光区产生的热流量需要通过几乎整个芯片厚度（100～200μm）的距离才能将热流量传导出管芯，造成芯片热阻很大。对于大功率 LED 器件应用，正装方式将造成 LED 结温升高、器件性能大幅降低，甚至不能正常使用。

表 3-1　常用 LED 衬底材料的性能

衬底材料	导热系数/W/(m·K)	膨胀系数/$\times10^{-6}$	稳定性	导热性	成本	静电释放能力
蓝宝石（Al_2O_3）	46	1.9	一般	差	中	一般
硅（Si）	150	5～20	良	好	低	好
碳化硅（SiC）	490	－1.4	良	好	高	好
砷化镓（GaAs）	56	6	良	好	高	好
钨铜合金	180～260	7.0～11.7	良	好	中	差

碳化硅化学稳定性优良、导电性能好、热导率高、禁带宽度宽、晶格热失配小，也适合用于蓝绿光 LED 衬底，并具有以下优势：

（1）由于导电性能好，可以制备工艺简单的垂直结构 LED 芯片；

（2）热导率比于蓝宝石衬底高约 10 倍，芯片热阻也将降低到 10%，即使正装也可以满足大功率 LED 的正常使用；

（3）由于晶格热失配小，容易生长出缺陷少的高质量发光层，内量子效率更高。

碳化硅的单晶质量还没有达到蓝宝石的水准，机械加工能力也较弱，特别是高的单晶制作成本是阻碍碳化硅衬底快速普及发展并替代蓝宝石的瓶颈。

3.2.2　功率型 LED 芯片

一般将电功率 0.5W 以上的 LED 芯片称为功率型。为保证器件可靠稳定地工作，需要较低的器件热阻，如 luxeon 系列 1W 的 LED 器件的热阻小于 10K/W，如图 3-10 所示。该热阻包括了芯片本身的热阻（简称芯片热阻）和封装材料、封装工艺带来的热阻（简称封装热阻）。对于功率高于 0.5W 的 LED 芯片设计必须要考虑散热结构，常用的功率型 LED 芯片结构包括：正装型芯片、倒装型芯片（flip-chip，FC）、置换衬底型芯片。

1．正装芯片

正装芯片也称为常规芯片（conventional chip，CC），图 3-11 为晶元公司 1W 正装芯片的结构图。该芯片的衬底为蓝宝石，在 p 型层上挖槽依次通过有源层（图中虚线）、n 型

缓冲层中部制出 n 型电极。围绕 n 电极在 p 型层上制作出 p 电极，见图中对称的两条细曲线。这种电极图形可以使得流过有源层的电流均匀化。该芯片的尺寸为：芯片的长和宽 38mil（965μm），厚度 5.9mil（150μm），p 型电极键合垫（bonding pad，BP）材质为金，直径 3.9mil（100μm），n 型电极键合垫材质也为金，直径 4.1mil（105μm）。芯片的主要指标见表 3-2。

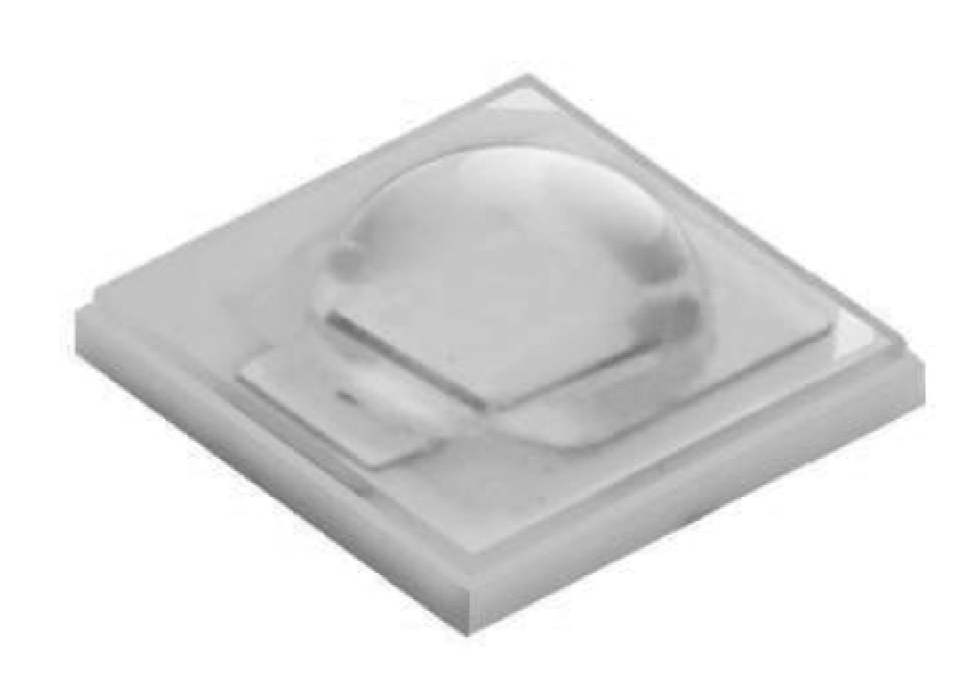
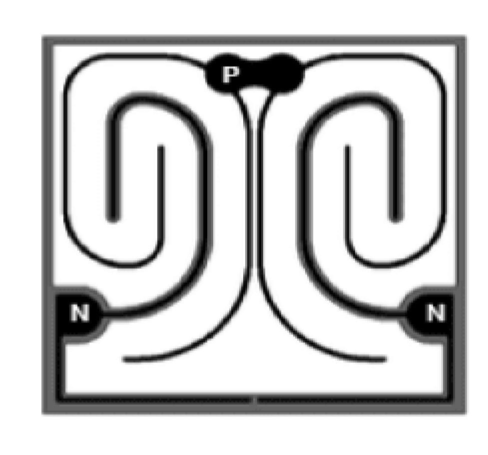


图 3-10　luxeon 系列 1W 的 LED 器件结构示意图



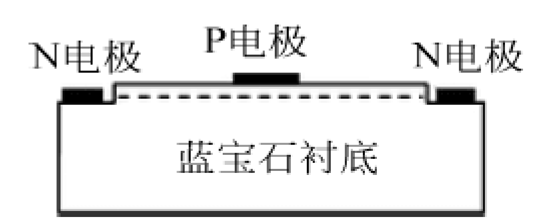


图 3-11　晶元公司 1W 正装芯片的结构图

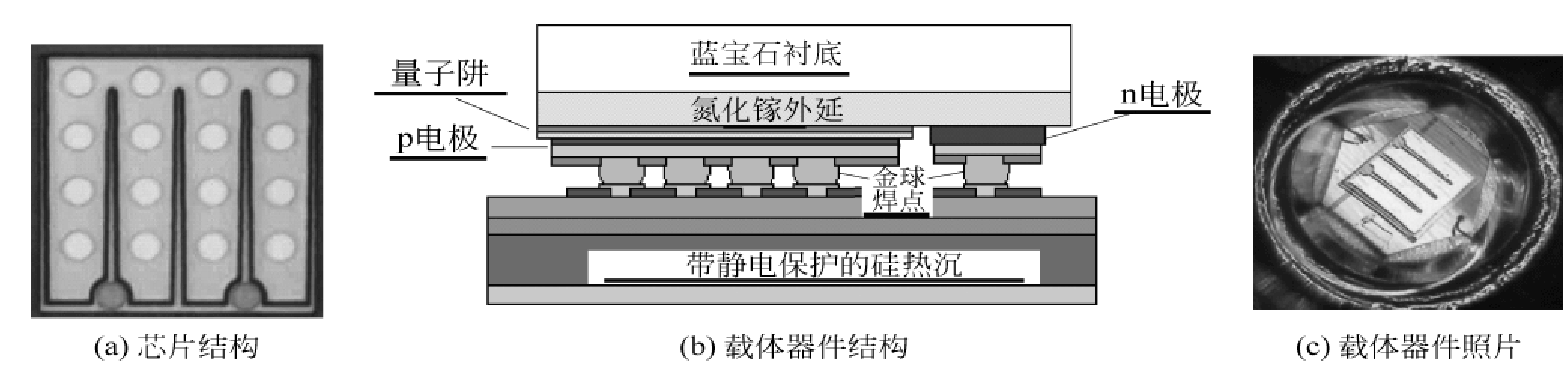
表 3-2　晶元公司 1W 正装芯片的光电参数

参　数	符　号		条　件	最小值	典型值	最大值	单　位
正向电压	V_{f1}		$I_f=350\mu A$	1.6	—	—	V
	V_{f2}		$I_f=350mA$	—	3.5	3.8	V
反向电流	I_r		$V_r=5V$	—	—	2	μA
主波长	λ_d		$I_f=350mA$	455	460	465	nm
辐射功率	P_o	H13	$I_f=350mA$	185	—	220	mW
		H14		220	—	255	

2. 倒装芯片

倒装芯片（flip chip，FC）为常用的功率型 LED 芯片。图 3-12 为 Lumileds 公司生产的 1W 倒装 LED 芯片及载体器件、封装结构示意图。由图可知，芯片正负电极均制作在 p 面，直接将 p 面处的正负电极焊接到基板上，发光区距离芯片 p 面仅约 10μm 左右的距离，大大降低了芯片热阻。为了获得均匀的电流分布和小的热应变、高可靠的焊接质量，正负电极采用了大面积半透明镍金合金“插指”结构正负电极，图 3-12（a）中三个“细指”为 n 电极，它是在 p 面挖槽至 n 型缓冲层并形成欧姆接触而成，p 电极为与之交叉的 4 个“粗指”。并分别在图 3-12（a）中 p、n 电极的适当位置制作金球焊点（bump）用于焊接，如图 3-12（a）所示。封装中，首先将芯片的金球焊点与一硅基过渡基片（硅热沉）上对应的电极焊点对准之后共晶焊接制出载体器件，见图 3-12（b）。为易于封装在圆形管壳上，可将硅热沉设计为六角形。然后，再将该载体器件安装至支架或管壳中。由于在硅基片上容易制作齐纳二极管用于 LED 的静电放电（electro static discharge，ESD）保护，这种结构可以大大缓解由于绝缘性蓝宝石衬底引起的静电损伤。这种 LED 芯片与硅热沉间的

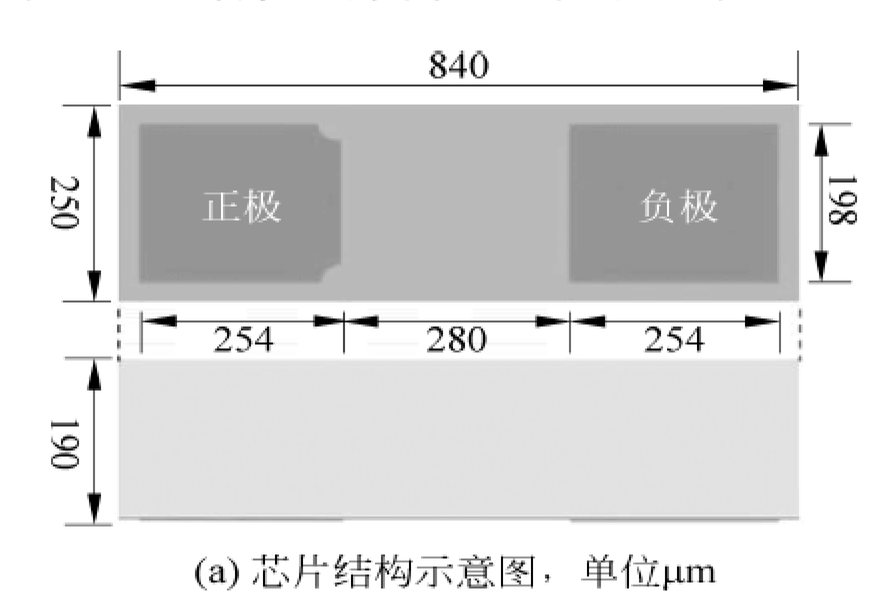
焊接需要高精度的金球焊点对金球焊点共晶焊接设备，技术要求高、设备昂贵、有效焊接面积小造成的焊接热阻较高。封装厂家直接购买载体器件进行二次封装，既增加了附加热阻，也增加了成本。



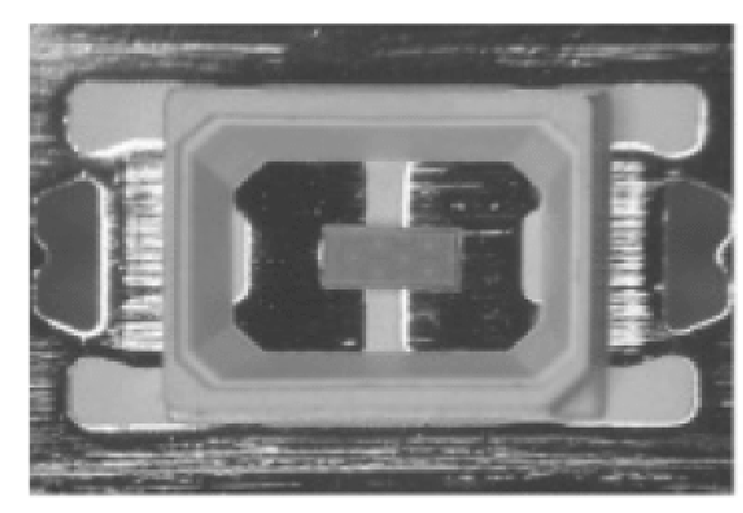
(a) 芯片结构　　(b) 载体器件结构　　(c) 载体器件照片

图 3-12　Lumileds 公司 1W 倒装 LED 芯片结构和载体器件结构及载体器件照片

图 3-13 为另一种近几年发展起来的实用化倒装 LED 芯片，可以直接封装在普通基板或管壳内。由图 3-13(a)可知，芯片正负电极为尺寸相等的两个均匀大面积加厚金属层外电极，制作在蓝宝石衬底的背面，间隔约为芯片长度的 1/3。其中，外电极的阴极(n 电极)内部通过在其局部挖槽或微孔至量子阱有源层背部的 n 型缓冲层形成 n 型欧姆接触。由于外电极有效散热面积的增加，热阻较前一种更低，使用常规的芯片贴片机、800 目以上银锡或银铜锡系列焊膏即可进行贴装，之后可在气氛炉中经预热浸润和高温熔融两个过程获得满意的焊接结果。但是，这种结构的芯片电流分布劣于前一种，对基板的热膨胀系数要求更为严格，芯片设计中必须考虑背向反射光的增强处理。图 3-13(b)为封装在 2835 管壳的倒装芯片的照片。



(a) 芯片结构示意图，单位μm



(b) 封装在2835管壳内的照片

图 3-13　一种实用倒装 LED 芯片结构示意图及封装在 2835 管壳内的照片

主要指标见表 3-3，典型的光电曲线见图 3-14～图 3-19。

表 3-3　芯片典型光电参数(测试环境温度 T_a=25℃)

参　数	符　号	测试条件	最小值	最大值	单　位
正向电压	V_{f1}	I_f=90mA	2.8	3.4	V
	V_{f2}	I_f=10A	2	—	V
漏电压	I_r	V_r=−5V	0	2	A
亮度	Lop	I_f=90mA	125	140	mW
主波长	λ_d	I_f=90mA	450	460	nm

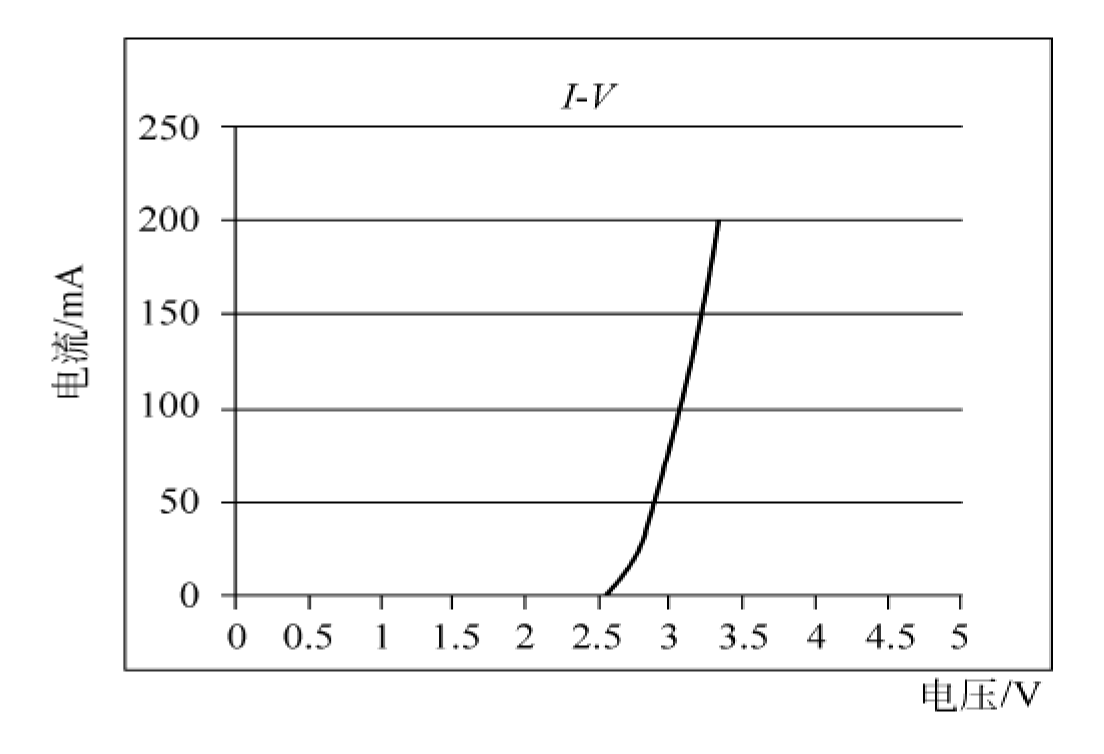


图 3-14 驱动电流与工作电压关系

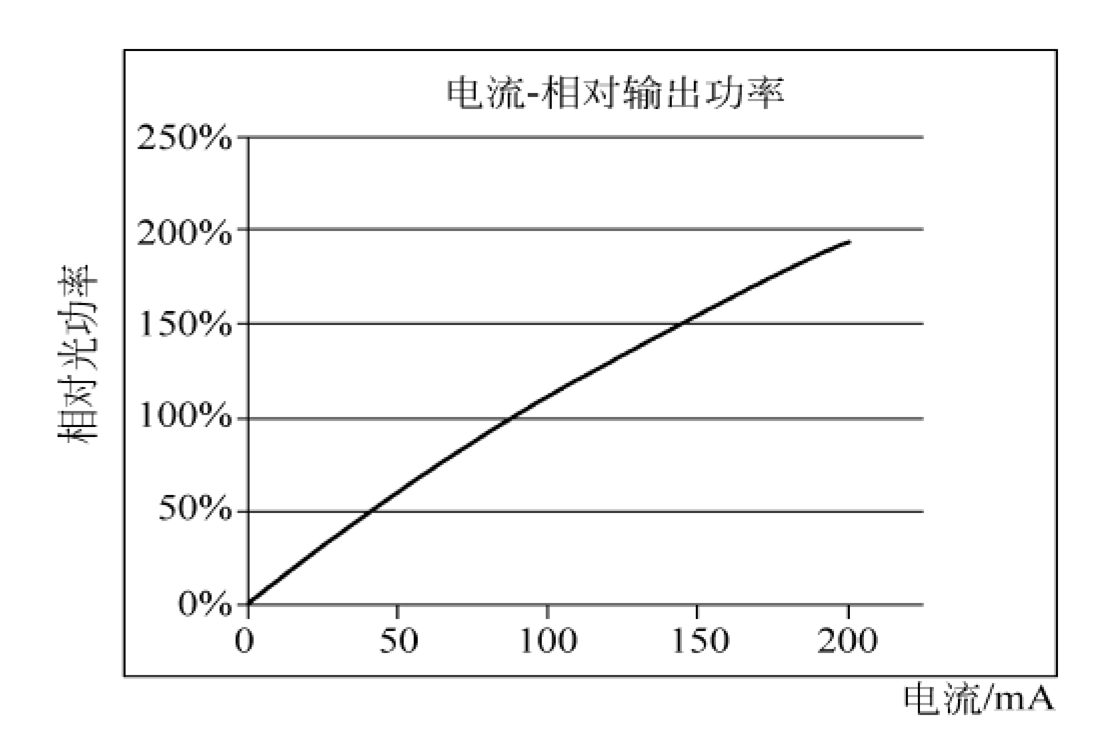


图 3-15 驱动电流与输出功率关系

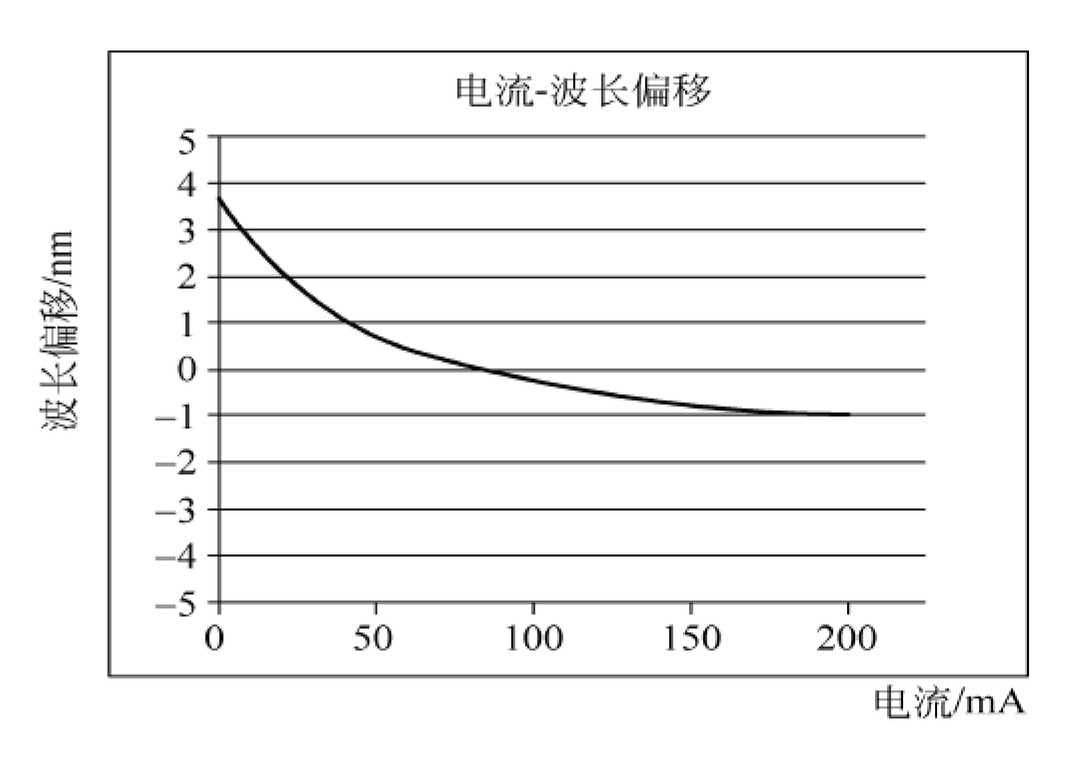


图 3-16 驱动电流与波长偏移关系曲线

3. 置换衬底型芯片

另外一种降低芯片热阻的方法是将热导率低的衬底置换成热导率高的材料，制作思路为将制出的 LED 外延结构片从 n 型缓冲层处与衬底分离，然后将分离后的 p 型层与

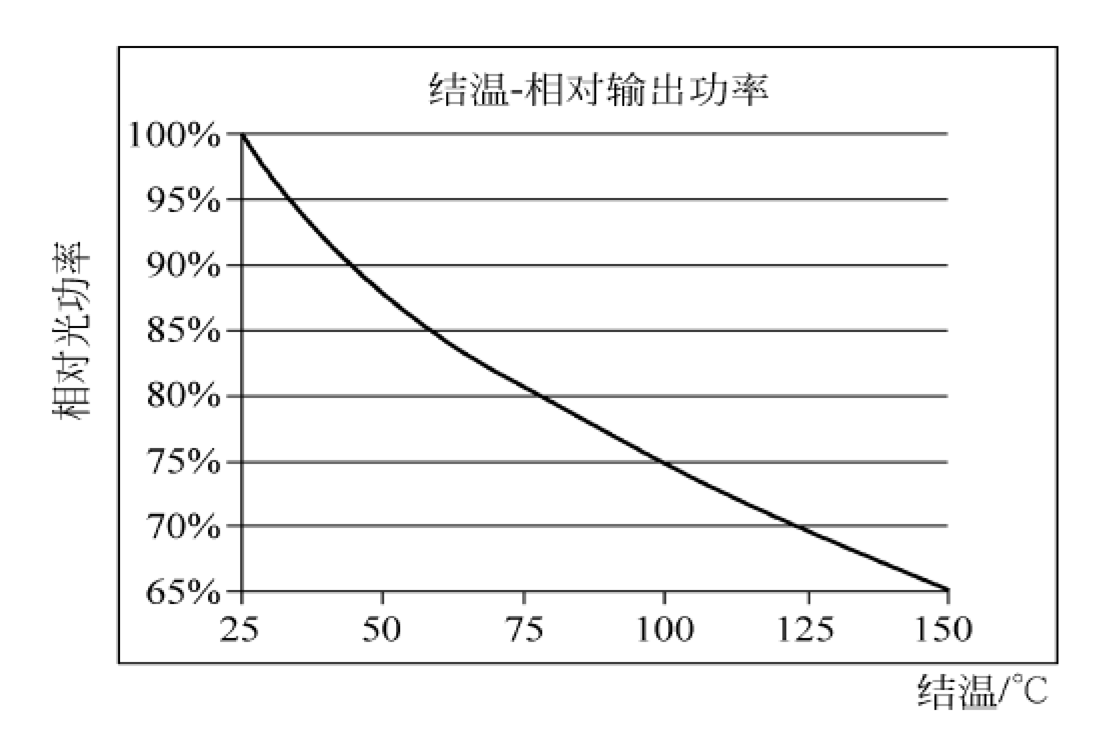


图 3-17 结温与输出功率关系曲线

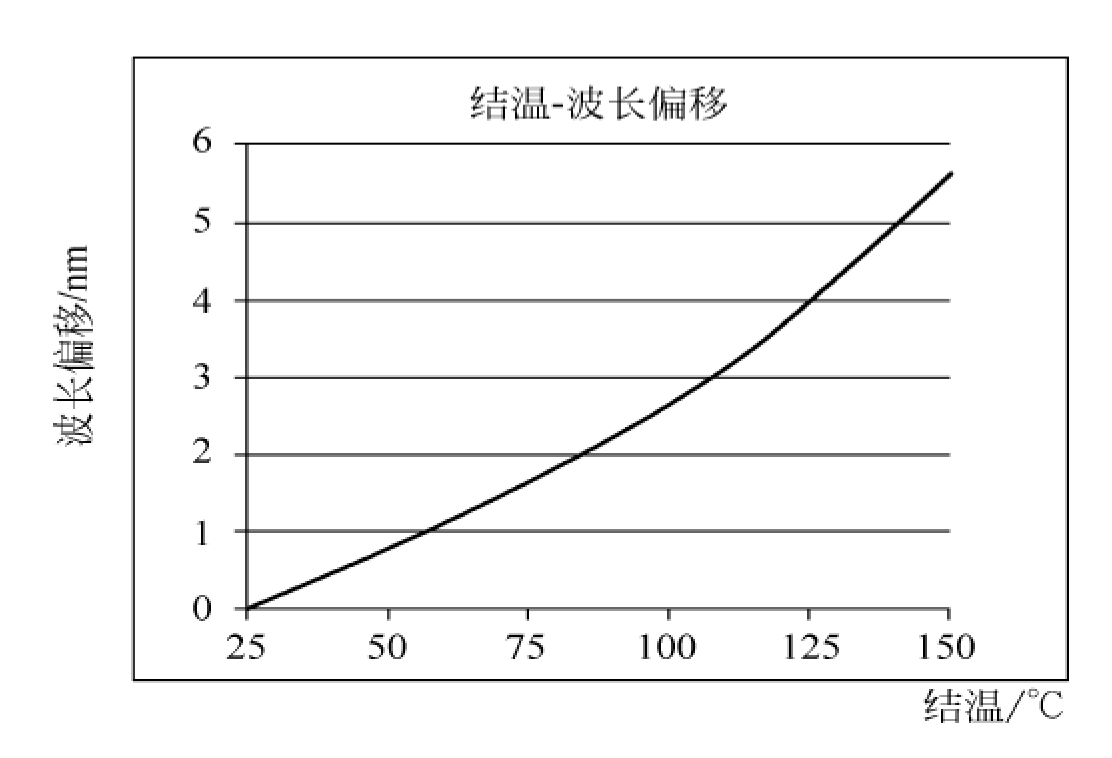


图 3-18 结温与波长偏移关系曲线

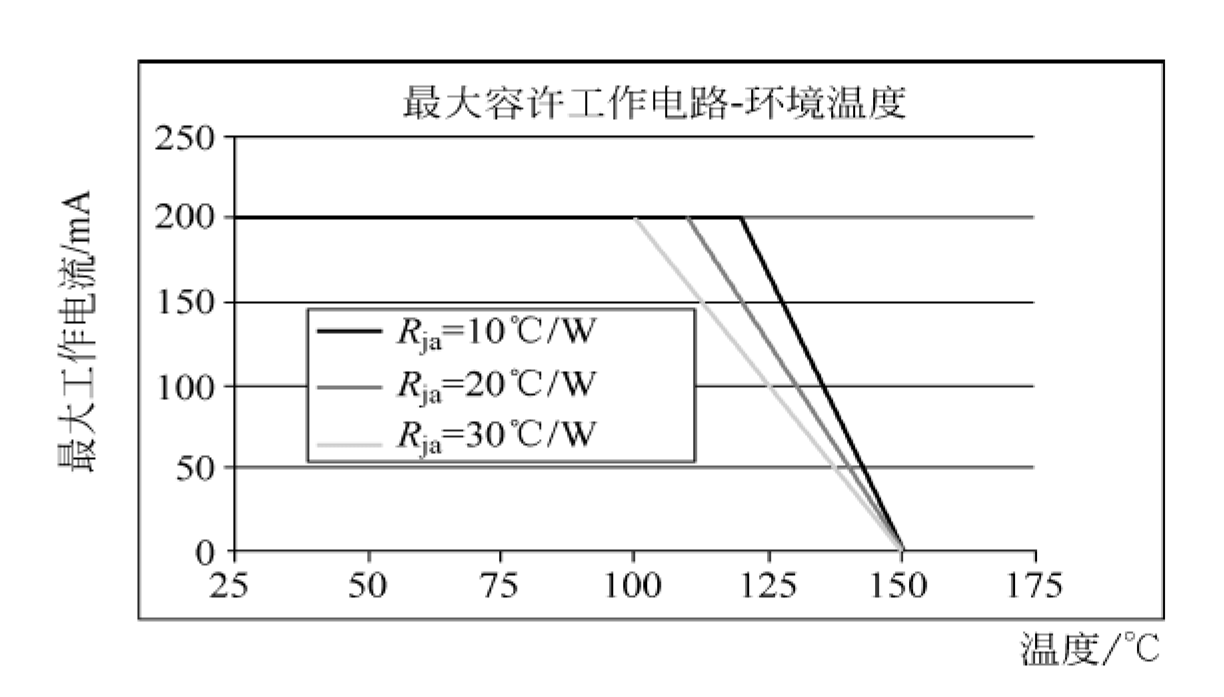


图 3-19 环境温度与最大容许工作电流关系曲线

高热导率材料键合或焊接为一体,最后在 n 型缓冲层、置换衬底处分别制作正负电极。

分离工艺有许多方法,比如对于易腐蚀的衬底材料(如砷化镓)采用湿法腐蚀至缓冲层。对于难腐蚀的衬底材料(如蓝宝石)可以采用激光剥离技术(laser lift off,LLO)。LLO 原理为波长为 248nm 的氩离子激光辐射至 GaN 与蓝宝石界面,激光能量热分解 GaN 为 Ga 原子和氮气,加温外延片至 Ga 的熔点,即可将 GaN/AlGaN 系外延层与蓝宝

石衬底分离。

为获得低热阻，置换衬底后待键合材料的热导率要更高，其热膨胀系数与外延材料接近，同时还要考虑置换后新衬底对光的吸收问题。若禁带宽度低于所发光子能量，则应考虑在键合界面增加光反射层，以提高出光效率。对于常用的蓝宝石衬底生长的AlGaN/GaN 基 LED，典型的置换衬底为硅，由表 2-1 可知，硅的热导率大约是蓝宝石的3 倍，置换衬底后 LED 芯片热阻减少了 2/3。但是，由于硅的禁带宽度小于蓝宝石，为避免硅的光吸收，应在硅与 p-GaN 键合界面设置反光层。也可将剥离掉蓝宝石后的 LED 焊接至铜合金衬底上，或者在金属化后的 p 型 GaN 层外电镀铜层形成衬底，如图 3-20 所示，称之为垂直薄膜(vertical thin film，VTF)LED 芯片，原因是芯片侧面的出光尺寸很小，光通量几乎 100%从芯片表面向上输出。当然，也可将倒装 LED 结构片键合至对应的高导热绝缘衬底(如硅)上，并在绝缘硅衬底上制出正负电极及焊接垫。然后再进行激光剥离、切割划片等工艺，最终制成倒装的薄膜结构芯片(thin film flip chip，TFFC)。与传统的倒装芯片和垂直薄膜 LED 芯片相比，TFFC 具有更高的亮度、更大的输出光通量及更好的热特性。

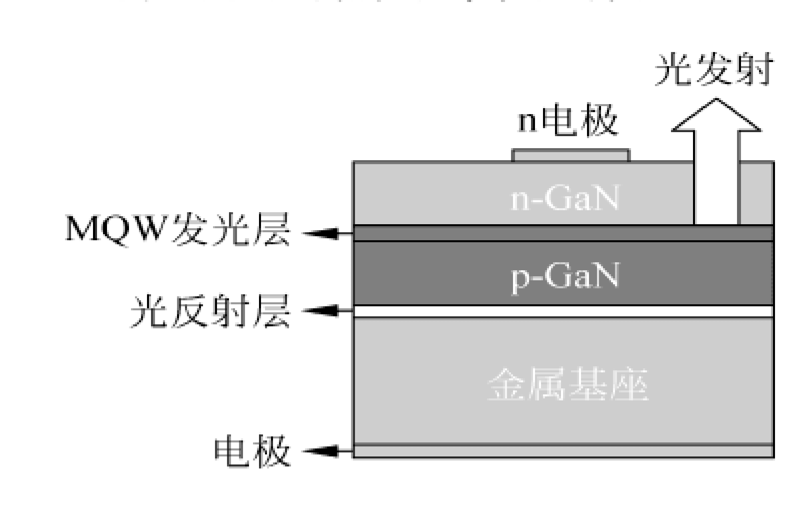


图 3-20　垂直薄膜(VTF)LED 芯片示意图

3.3　LED 芯片热特性

LED 是热敏发光器件，结温的升高将引起 LED 性能与寿命的劣化。

3.3.1　结温与热阻

1. LED 的结温(pn junction temperature，T_j)

LED 工作过程中，在非辐射复合及光子吸收产生的晶格振动、半导体材料体电阻、金属—半导体欧姆接触电阻、封装材料电阻等原因产生的焦耳热共同作用下，热平衡后 pn 结区将维持在某个高于外部环境的温度，称此温度为 LED 的结温。利用 LED 各物理量与温度的关系可以求出结温，也可利用 LED 光电参数与温度的关系直接测出结温，最常用的方法为正向电压法。首先，将 LED 器件安装在一散热功率足够的散热器上，在小电流条件下测出室温 T_0下的正向偏压 V_{f0}，再将该 LED 器件置于温度为 T 的烘箱中待热平衡，在相同小电流条件下测出温度 T 下的正向偏压 V_{fT}；依据经验公式(3-1)测出 LED 的温度系数 k_v

$$k_v = (V_{f0} - V_{fT})/(T_0 - T) \tag{3-1}$$

所谓小电流条件是指该电流对 LED 结温不产生明显的温升，一般应小于标称工作电流的 3%，如工作电流为 350mA，测试用的小电流不高于 10mA。最后，将该 LED 再次移出烘箱置于室温环境，待完全冷却至 T_0时施加正常标称工作电流，此时，LED 的结温

升高至 T_j，依据经验公式(3-2)即可测出 LED 的结温

$$T_j = k_v(V_f - V_{f0}) + T_0 \tag{3-2}$$

式中，V_f为标称工作电流下的正向电压。

2. 稳态热阻(steady state thermal resistance，R)

简称热阻，指系统热平衡后 LED 的结温与环境温度差与所输入的产生该温度差的电功率之比，可由下式表示：

$$R = \frac{T_j - T_a}{Q} = \frac{T_j - T_a}{P_d} = \frac{T_j - T_a}{IV_f - P_0} \tag{3-3}$$

需要注意的是，式中的 Q 为 LED 工作时产生的热流量，即为热设计功率(thermal design power)，用 P_d表示。由前述的 LED 发光原理可知，它为输入的总电功率 IV_f 与发光功率 P_0之差。系统总热阻等于各个不同结构层的热阻串联之和，包括：LED 芯片＋热沉的热阻(封装后的 LED 器件热阻)、PCB 铝基板(包括热沉与基板的接触热阻)、散热器至空气界面的热阻(包括散热器与基板的接触热阻及对流热阻、辐射热阻)。

对于已确定芯片、封装结构及工艺制作出的 LED 器件，其热阻是确定的，外量子效率也是确定的。此时，LED 的结温与环境温度之间存在一个由公式(3-3)确定的关联关系，环境温度的升高、注入电流的增加、封装制程中的不良操作等均可造成结温的升高，导致 LED 性能变差。

3. 瞬态热阻(transient thermal resistance)

指热平衡前的热阻，是时间的函数，初始值很小，逐步增加，直至达到稳态热阻。

LED 系统的热平衡时间正比于传热/散热材料的质量、表面积、热容量，也与散热环境条件相关。例如，在散热环境相同的条件下，未加散热器的 LED 器件的热平衡时间短于加有散热器的；对于安装在结构相同、材料不同(如铜和铝)散热器的 LED 器件，由于铝的比热容(880J/(kg·K))大于铜(390J/(kg·K))的，所以，前者的热平衡时间长于后者。

热设计中使用的是稳态热阻，也是半导体热设计相关国际标准与国家标准需要检测的参数。热设计中不直接使用瞬态热阻，但是，通过测试 LED 的瞬态热阻特性可以分析系统的热结构，从而获得系统各个部分的热阻值，详细内容见第 6 章。

3.3.2 光通量与温度的关系

结温升高后，电子动能增大，使得阱内电子越过势垒逃出势阱的几率增加，造成阱内载流子逃溢。同时，结温增高也导致辐射复合速率降低，这均将造成 LED 光通量、光功率、发光强度(简称光强)随温度的升高而下降。它们之间的关系可由下述经验公式表示：

$$I(T) = I(T_0)\exp[-k_\Phi(T - T_0)] \tag{3-4}$$

式中，T 为工作温度；T_0为参考温度(一般为室温)；$I(T)$为该温度下的发光强度；k_Φ 为温度系数，与 LED 材料等相关。图 3-21 为三种不同半导体材料制成的红、绿、蓝 LED 的光强与温度的关系曲线。由图可见：蓝光 LED 的光强随温度的变化率最小，$k_{\Phi B} \approx 1.2 \times 10^{-3}$；红光 LED 的光强随温度的变化率最大，$k_{\Phi R} \approx 9.5 \times 10^{-3}$；绿光 LED 的变化介于二者之间。

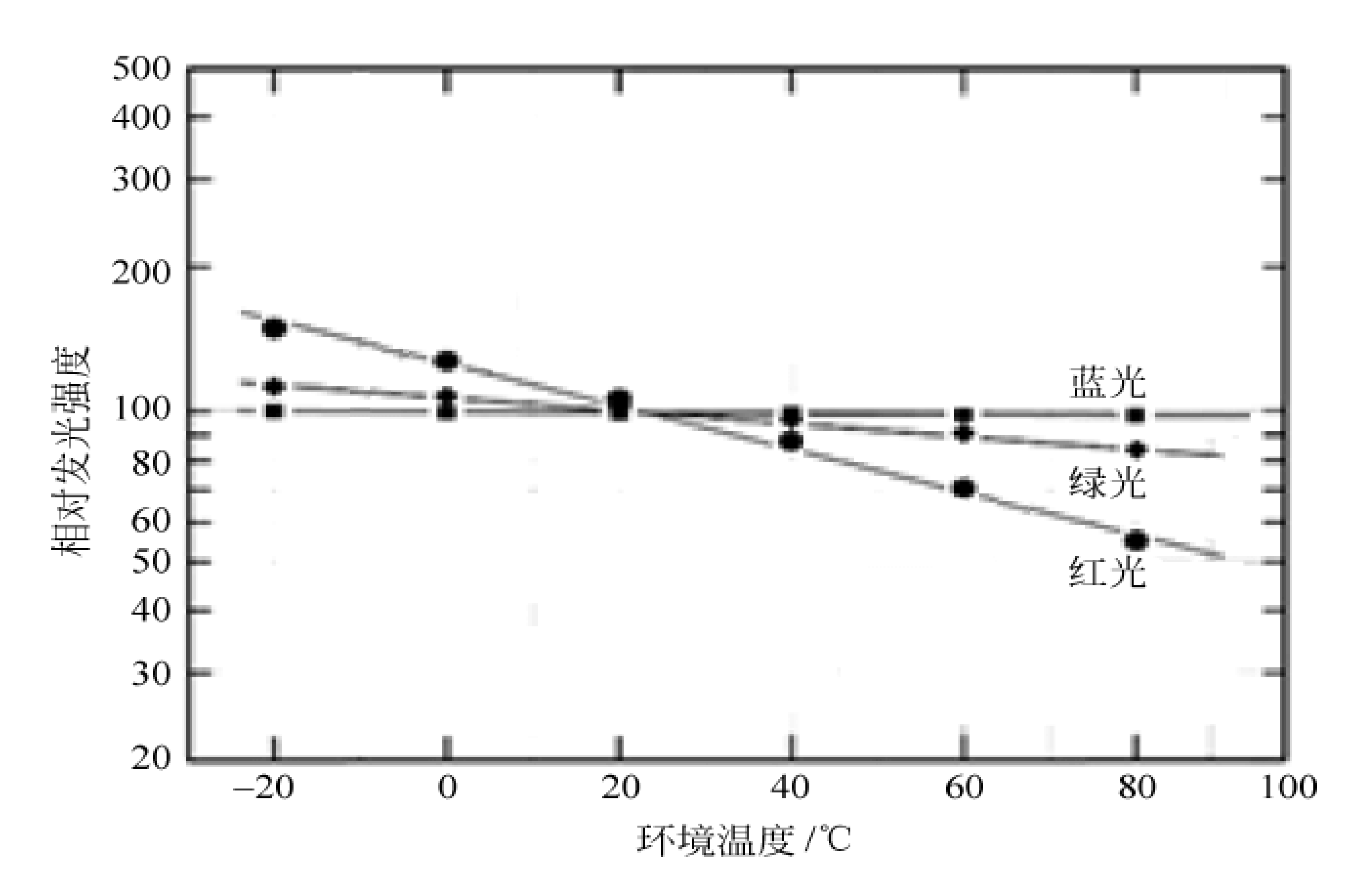


图 3-21　三种 LED 的光强与环境温度的关系曲线

3.3.3　辐射波长、色温与温度的关系

同样，结温升高后，激子间的复合几率增加，造成 LED 辐射波长发生红移（向长波段漂移）。同时，光谱半宽也将增大。中心波长与温度之间的关系可由下述经验公式表示：

$$\lambda_0(T) = \lambda_0(T_0) + k_\lambda(T - T_0) \qquad (3\text{-}5)$$

式中，k_λ 为温度系数，约为 0.1～0.3nm/K，与 LED 的材料等相关。实测结果见图 3-22。采用蓝光 LED＋黄色荧光粉制成的白光光源的色温也将随温度发生漂移，同时，蓝光波长漂移出荧光粉的最佳吸收波长后还将造成吸收效率和发光强度的下降。

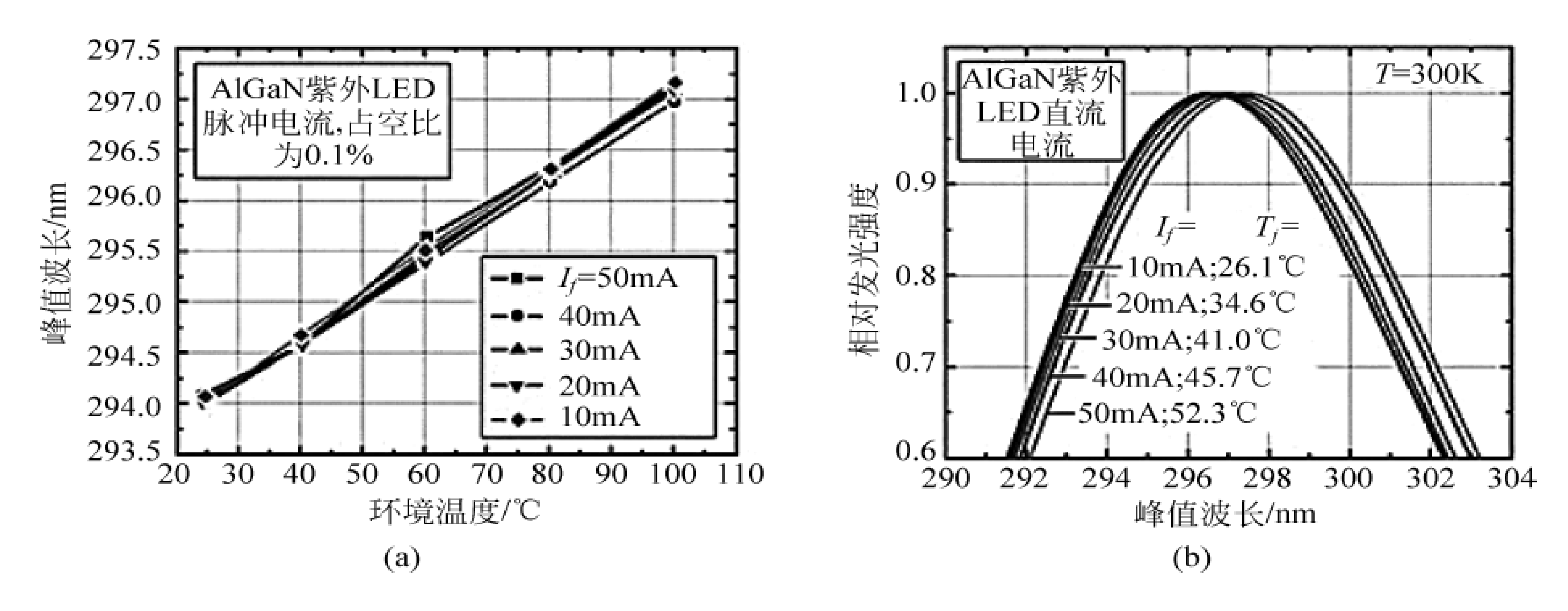


图 3-22　蓝光、白光 LED 中心波长、色温与环境温度的关系

3.3.4　正向电压与温度的关系

由 pn 结电流—电压公式可知，结温升高，反向饱和电流 I_0 快速增大，正向电压将减

小,实际工作中多用以下经验公式描述:

$$V(T) = V(T_0) - k_v(T - T_0) \tag{3-6}$$

式中,k_v 为温度系数,约为 1.5～2.5mV/K,与 LED 的材料等相关。在 LED 使用过程中需要特别注意,如若采用恒压源驱动 LED,当结温升高后,由于正向电压(开启电压)的减小,将会导致驱动电流的急剧增加,很容易损伤 LED。因此,采用恒流源驱动 LED 更为可取。

3.3.5 寿命与温度的关系

LED 各半导体材料层及表面均存在缺陷,结温的升高加速了缺陷的繁衍。当缺陷进入有源区时将产生非辐射复合中心,造成输出光功率的下降,一般定义当光功率下降至初始值的 70%时对应的工作时间为 LED 的寿命。LED 光通量随时间的变化遵从阿伦尼茨模型,如下式所示:

$$\Phi(t) = \Phi(0)\exp(-\beta t) \tag{3-7}$$

式中,t 为时间;$\Phi(t)$为 t 时刻的光通量;β 为寿命衰减系数,由下式决定:

$$\beta = \beta_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right) \tag{3-8}$$

式中,E_a 为激活能,由 LED 有源区材料、器件结构决定;k 为玻尔兹曼常数。由上述两式可以看出,随着结温的升高,衰减系数急剧增大,LED 的寿命快速衰减。图 3-23 为实测的 K2 型 LED 结温与工作寿命的关系曲线。由图可见,结温 55℃时,LED 的寿命大于 10 万小时,而当结温升至 105℃时,LED 的寿命仅 1 万多小时。通过分组测试不同结温下的光通量随时间的变化,从实验数据中拟合出激活能,从而可以推算出常温下 LED 的工作寿命。

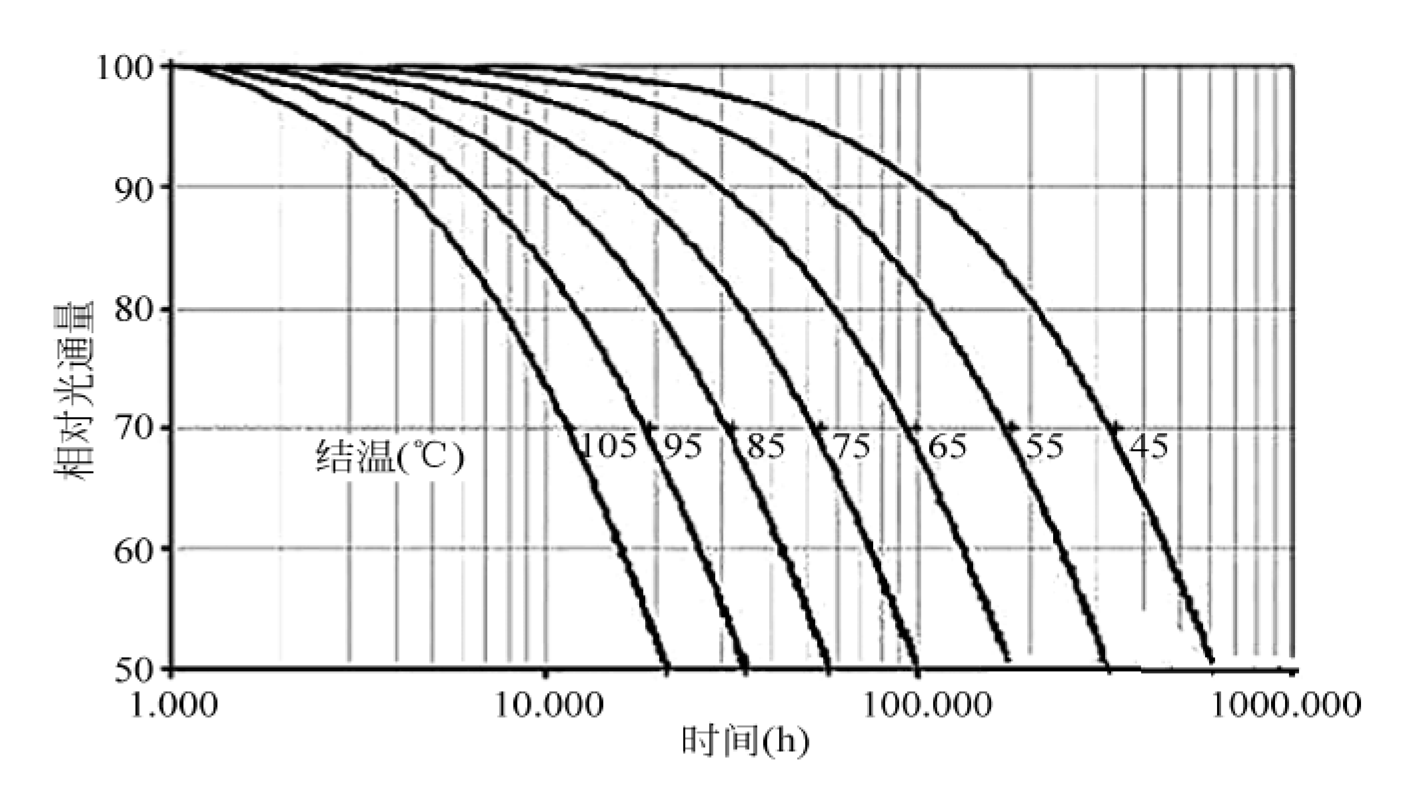


图 3-23 Luxeon K2 型 LED 结温与寿命的实验曲线

思考题

1. 垂直结构芯片与平面结构芯片的区别与各自的优势分别是什么?
2. 试说明同质结 LED 工作原理与其存在的主要问题。
3. 与同质结相比,双异质结和量子阱 LED 的优势及原因。

4. LED发热的根本原因是什么？能否根除？

5. 与正装蓝宝石衬底LED相比，倒装结构在封装中的优势是什么？解释原因。

6. 倒装LED有几类？各自的特点是什么？

7. 何为薄膜型LED？主要特点是什么？

8. 何为LED的结温？与热阻的关系是什么？

9. 计算热阻时为何要用热功率而不能直接使用输入电功率？

10. 为何说LED是热敏感型器件？举例说明其参数与温度的关系？

11. 温度升高LED光通量降低的主要原因是什么？

12. 何为开启电压？它与禁带宽度的关系是什么？其物理本质是什么？温度升高LED开启电压降低的主要原因是什么？

13. 温度升高LED辐射波长红移的主要原因是什么？

14. LED寿命与结温的关系是什么？举例说明。

15. 图3-19曲线的物理意义是什么？如何推导出该曲线？工作中如何用好该曲线？

习题

1. Ge、Si、AlGaInP、AlGaInN的禁带宽度分别为0.7eV、1.1eV、2.0eV和2.7eV，试计算它们对应的发光波长，并解释为何不将Ge、Si材料作为LED的有源层。

2. 蓝宝石衬底上生长GaN分别制作正装、倒装LED，设衬底厚度100μm、发光层等厚度10μm，在不考虑电极沟槽的情况下，试计算正装、倒装LED的芯片热阻。

3. 一只1W的LED其输出光功率为0.3W，结温为100℃，试计算室温下的热阻。

4. 分别计算蓝宝石衬底的蓝光LED在环境25℃和50℃时的光通量、中心波长的变化量，若在其外涂覆黄色荧光粉制作白光LED，试讨论对色温的影响。设波长的温度系数为0.3nm/K。

5. 以Luxeon K2型LED为例，分别论述其寿命为10万小时、5万小时、1万小时的结温条件，若将其热阻降低一半，其寿命分别提高到多少？

第4章 LED封装与热设计

LED封装是在半导体分立器件（二极管、三极管）、集成电路（IC）封装技术的基础上发展起来的，并不断借鉴快速发展的半导体产品封装技术的经验。传统封装（package）的定义是给半导体芯片提供能量（电功率）、电气连接、冷却、保护、支撑及人机接口的方法及装置。对于以LED代表的半导体光电器件而言，封装的含义还应包括提供光输出的窗口（光接口）。也就是说我们无法直接使用LED芯片，必须使用一定的方法及装置将芯片电极与外部电源连接并驱动它，完成电信号至光信号的转换；提供适当的方式将LED工作时产生的热量散发至空气中，避免LED芯片因为过热而降低性能甚至失效；提供适当的方式保护LED芯片免受外部水蒸气、盐分、射线的破坏，使之可以在日常甚至恶劣环境下能够正常可靠地工作。此外，功率更大、功能更多、性能更好、成本更低、外观更美、使用更便利也是LED封装的技术追求。

4.1 封装的层级

以IC为例讨论封装的层级概念。一般规定从芯片至最终应用系统可分为5个封装层级，如图4-1所示，即：0层级，在IC晶片上继续进行布线、电极凸点制备的过程；1层级，将切割后的IC芯片制出器件或组件的过程；2层级，将若干器件或组件、其他元件组装在电路板的过程；3层级，将若干电路板组合至母板的过程；4层级，将若干母板组合成最终应用产品的过程。

随着芯片及封装技术的进步，现在的封装也往往超越上述的层级规定，如跨越层级1将芯片直接贴片至电路板（chip on board，COB），有人将之称为1.5层级。一般将多个相同功能或不同功能的芯片、元器件封装在同一电路板上制成多芯片模块（multichip module，MCM）。层级的多少与最终产品的复杂程度相关，未必所有产品的封装层级均能达到4层级。同时，层级的多少也与芯片技术的进步相关，当一个芯片具备的功能越来越多时，需要的芯片数目越来越少，封装的过程越来越简化，封装的层级数也将会越来越少。技术发展的最终目标是将所有系统功能整合在单一芯片中，实现所谓的片上系统

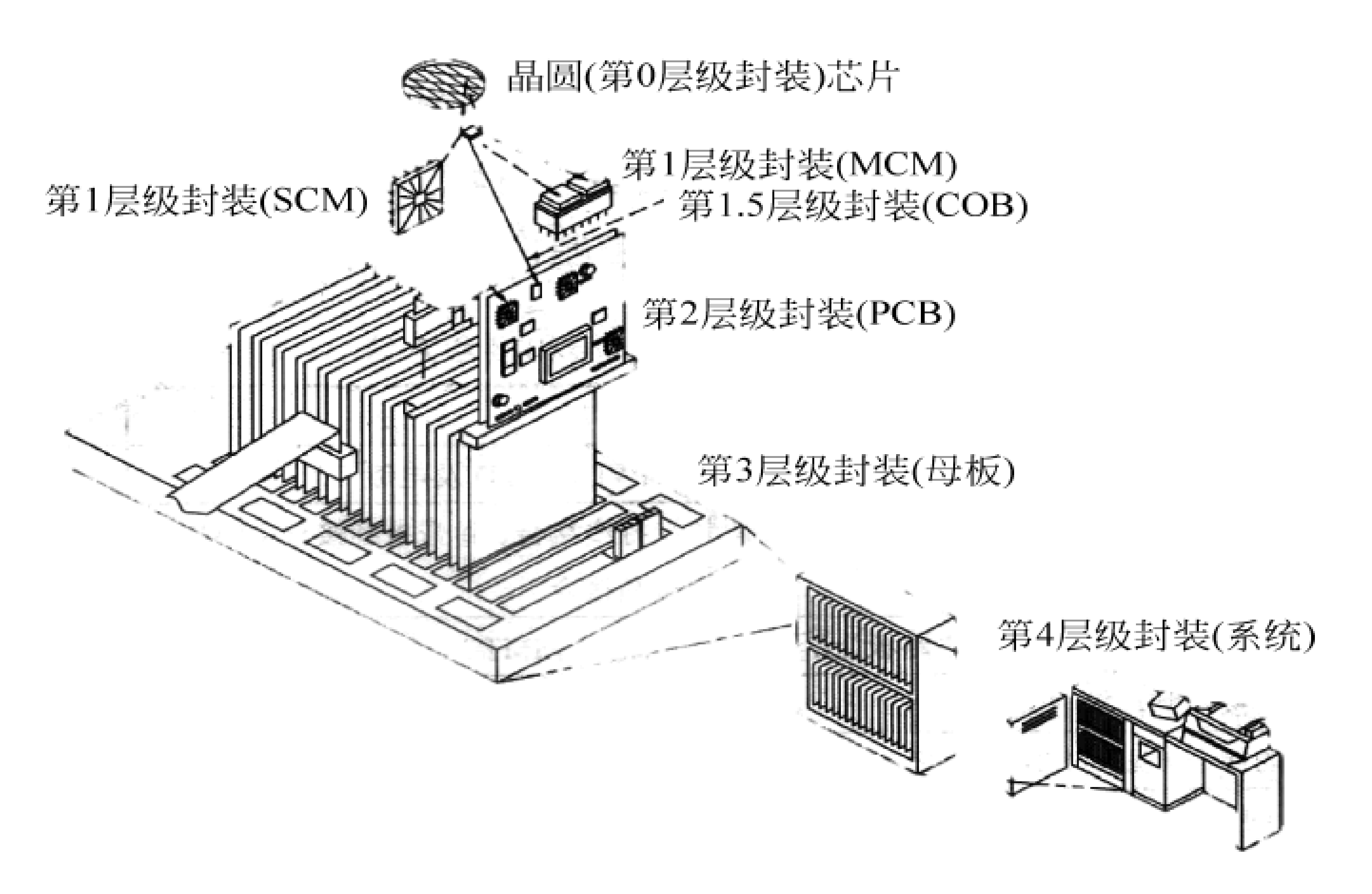


图 4-1　封装层级示意图

(system on chip,SoP)。

虽然 LED 及应用产品的封装比电子产品的简单,但对 LED 而言上述封装层级概念同样适用。如倒装芯片及高压芯片(将 n 个 LED 元胞在晶片上完成串联布线的一种 LED 芯片,其工作电压是单个芯片元胞的 n 倍)属于 0 层级,一般的 LED 器件属于 1 层级,而 LED 光源则属于 2 层级,复杂的 LED 灯具应属于 3 层级。如同电子产品的封装发展趋势,LED 封装技术的一个重要方向也是向着简化封装过程发展。因为,多一个封装工艺制程就增加一份成本(材料成本与制作成本),也增加了更多发生失效的可能。所以,“最少的封装就是最好的封装”有其道理,最终实现“无封装”。近年来,一种将荧光粉保型涂覆在芯片表面、可直接焊接在电路板上使用的“无封装”(package free chip,PFC) LED 器件引起了封装行业的重视。当然,直接将芯片封装在电路板上,必须考虑热应力失配造成的 LED 芯片性能降低甚至失效,制作具有热应力释放能力的芯片电极是解决上述问题的可能方法之一。

4.2　LED 的封装

4.2.1　LED 封装的作用

1. 物理支撑及保护

固态照明用 LED 芯片最常用的发光材料包括 GaAlAs、AlGaInP、InGaN 等第二代、第三代半导体,机械强度很低,容易受外力的作用损坏,裸露在空气中的发光区也会氧化,或被杂质污染,从而引起性能的劣化。将 LED 芯片贴装在支架或管座上,并使用环氧树脂、硅胶密封,能有效提高 LED 的可靠性。

2. 电信号连接及安装结构形成

LED 芯片电极尺寸微小,一般不能直接使用,需通过引线键合工艺将芯片电极与支

架或管座内电极连接形成具有标准封装尺寸的 LED 器件，使用中其外电极与电路板焊接，完成电气连接。

3. 热传导通道

LED 是热敏感器件，其光色电参数及寿命均与结温相关，结温的升高将导致性能的劣化、寿命的缩短。设计良好的封装可以有效降低 LED 器件的热阻，高效、快速地将芯片热量传导至散热器，最终通过对流、辐射将热量传递到大气中，确保其正常、可靠地工作。

4. 白光合成及光输出窗口

常用的白光合成方法包括蓝光 LED+黄色荧光粉、多色 LED 混光，多在封装阶段完成。将蓝光 LED 封装在支架或管壳中，周围涂覆含有黄色荧光粉的胶水，或者将多只 RGB-LED 封装在同一支架或管壳中，留有一定的混光空间，并采用高透明胶水或 PMMA、PC 材料在芯片上部或四周制出透镜形成 LED 的光输出窗口。

4.2.2 设计的基本要素

半导体照明光源是进入千家万户的生活必需品，也是服务于社会各个方面的必需品，这些造成了对其成本的敏感性和高可靠性的使用要求。与微电子器件类似，封装一直是 LED 价格不可忽略的部分(约 30%～70%)，因此，降低封装成本并保持可靠性和性能一直是 LED 封装研究的焦点。封装设计中必须考虑的因素包括可制造性、可靠性、可服务性、尺寸、重量、集成度、机械稳定性、功率损耗以及伴随而来的热传导问题。封装成本取决于材料与制作过程的成本、测试与返修(多芯片集成封装)过程的成本。下面简单讨论影响封装性价比的一些因素。

1. 制作成本

制作成本包括物料及封装每个 LED 的制作工艺成本。物料不仅包括构成封装的实际材料，也包括为达到工艺制程要求处理这些物料的其他材料、工艺的附加成本。

2. 可制造性成本与可制造性设计

无论在 LED 封装设计中有多少精密构思，能够大规模批量生产才能获得具有竞争力的定价。大规模批量生产取决于物料的易获得性、处理技术、低成本的自动化制作设备、较短的工艺流程、较短的生产时间、可修复性，这些因素决定了制作成本。可制造性也叫可生产性，核心是在不影响产品功能的前提下，全员参与从产品的初步规划、产品投入生产的整个设计过程，简化工艺流程、使用通过率高的工艺、规范标准元器件、选择减少模具及工具的复杂性及其成本，由此达到让设计利于生产及返修、降低整个产品的制造过程成本的目的。

3. 尺寸和重量

封装后的 LED 会工作在特定环境中，往往尺寸和重量也会被作为性能指标。如智能手机液晶显示屏背光源用的微型侧出光型 LED。需要注意的是这些要求会影响 LED 封装设计的其他方面，如热设计。

4. 热设计

热设计的目标是通过良好的热传导将 LED 有源区 pn 结处的热量迅速传导掉以保障 LED 可靠工作。随着 LED 在半导体照明等领域应用的不断深入，LED 功率越来越大、芯片热流密度越来越高，伴随而来的热灾变、热应力失配产生的性能劣化甚至失效等均不可忽略，这些因素均影响性能、成本及可靠性。

5. 力学设计

如前所述的热应力问题，在封装材料选择(如弹性模量 E)、结构设计、贴片工艺设计中均应考虑，重点在于贴片区域和金丝球焊点区域。例如，贴片区域的三种材料(芯片、基板、焊料或胶体)形成两个界面，热应力随着 E 的增加及胶粘层厚度的减小而增加。适当加厚胶粘层有利于减少热应力引起的灾变，但是，还应注意加厚胶粘层引起的热阻增加。

6. 可靠性设计

产品的可靠性取决于设计、生产、检测各个环节，其中设计是基础。可靠性设计应从顶层规范封装过程中对芯片、基本封装材料、产品结构等设计中影响可靠性的各个环节着手。一般而言，合格半导体芯片的可靠性指标很高，影响 LED 器件可靠性的往往是一些“不起眼”的瑕疵，如不合格的支架或支架电镀未处理干净致使长期使用过程中产生的锈斑、支架及银浆或荧光粉中的硫化物残留、对耐紫外光差的胶水和包封材料等，均会在较短的时间内(几个月或稍长)造成 LED 的性能劣化甚至寿命终止。

7. 封装材料选择

应该关注 LED 封装材料的电学、力学、光学、热学、化学和物理性能，上述每一方面都会影响 LED 封装的制作、性能和可靠性。由于这些属性的广泛变化，导致 LED 封装技术应用材料选择的困难。与微电子封装行业一样，某一特定应用材料的最终选择往往是在取得或优化其他多个性能同时做出的折中。

4.2.3 封装的基本材料及原理

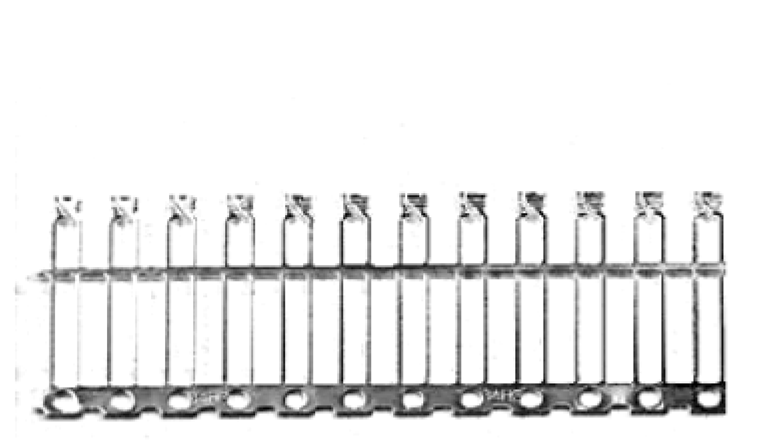
1. 小功率 LED 支架与基板

支架与基板都是 LED 器件的管座，承担芯片的支撑、电气连接与散热的功能。

1) 直插式支架

支架(lead frame)是采用金属(多为铜或铁的合金)板经冲压、电镀银等工艺制成的

一种连体式 LED 支架框，图 4-2(a)为直插式 LED 支架的照片，由于其热阻高达 200K/W 以上，只能用于普通的显示用小功率 LED 的封装。支架分为碗杯型、平头型和特殊型三类。碗杯型最为常见，如图 4-2(b)所示，将支架头部冲压成碗状反射杯，芯片置于杯底，反射杯可将 LED 芯片四个边面的出射光折射成为近似的平行光输出，适合于制作小发光角的 LED 灯珠。平头型支架的顶部为平面，适合于制作大发光角的 LED 灯珠。使用直插式支架封装的 LED 工作电流一般均低于 10mA。



(a) 直插式LED支架框　　(b) 直插式LED支架的反射杯剖面

图 4-2　直插式 LED 支架照片与反射杯剖面照片

2）食人鱼支架

为了克服直插式支架热阻高、芯片工作电流小的缺点，食人鱼支架缩短了支架引脚长度，增加了引脚数量(4 个)，最大工作电流可达 50mA，食人鱼支架照片如图 4-3 所示。

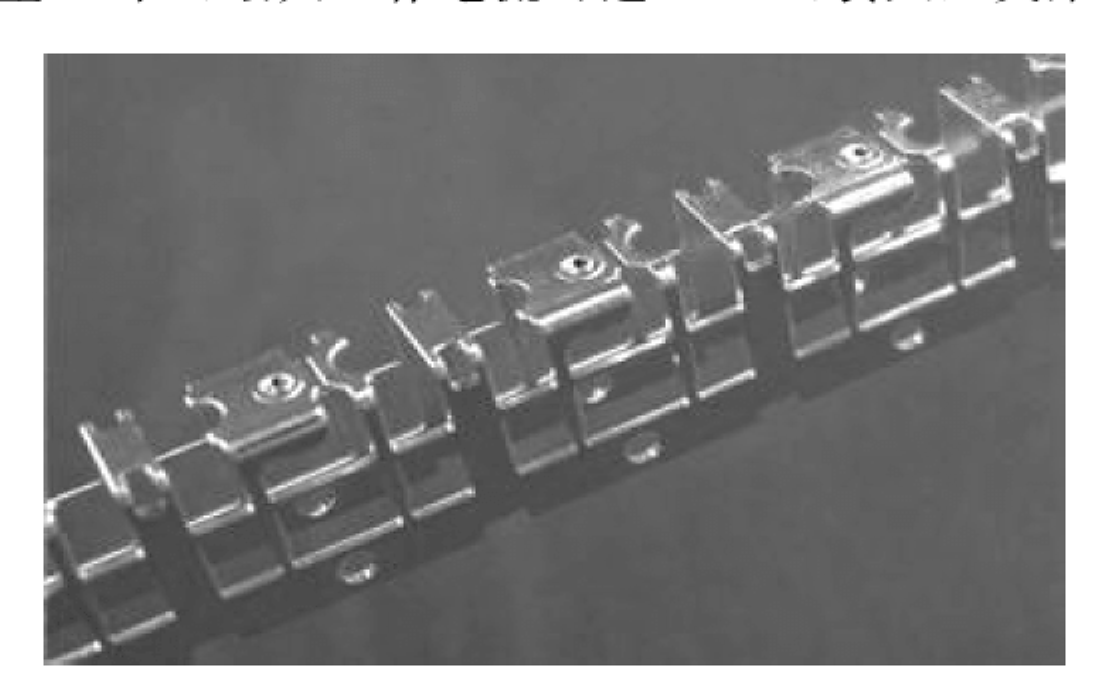


图 4-3　食人鱼支架照片

3）表贴式基板

表贴式基板是目前用量最大的 LED 管座，主要包括 TOP 型、PCB 片式、SIDEVIEW、LTCC 型四种。

TOP 型为最常见的顶部出光的 LED 支架，如图 4-4 所示，它是将厚度不大于 0.2mm 的铜板材经冲压、电镀银工艺制成半成品，使用注塑机将 PPA(聚邻苯二酰胺的简称)或 EMC(epoxy molding compound 的简称)，中文称为环氧树脂模塑料或环氧塑封料，它是由环氧树脂为基体，以高性能酚醛树脂为固化剂，加入硅微粉等为填料，以及添加多种助剂混配而成的粉状模塑料)模料与金属支架射出成型熔铸为一体，同时将模料压铸成反

射杯状。由于白色 PPA 的光反射率高于 85%，且成本低廉，是 TOP 支架的主体。但是，PPA 材料约 6%的吸水性成为潜在的气密性缺陷，而且耐高温老化、抗紫外衰减能力也有限。而 EMC 模料恰好可以克服上述问题，在高封装质量、高温、高可靠的 TOP 支架中已经开始导入 EMC 模料。常用的型号有 5050、3528、3020、335、215 等，如 5050 表示支架长宽尺寸为 5.0×5.0mm。

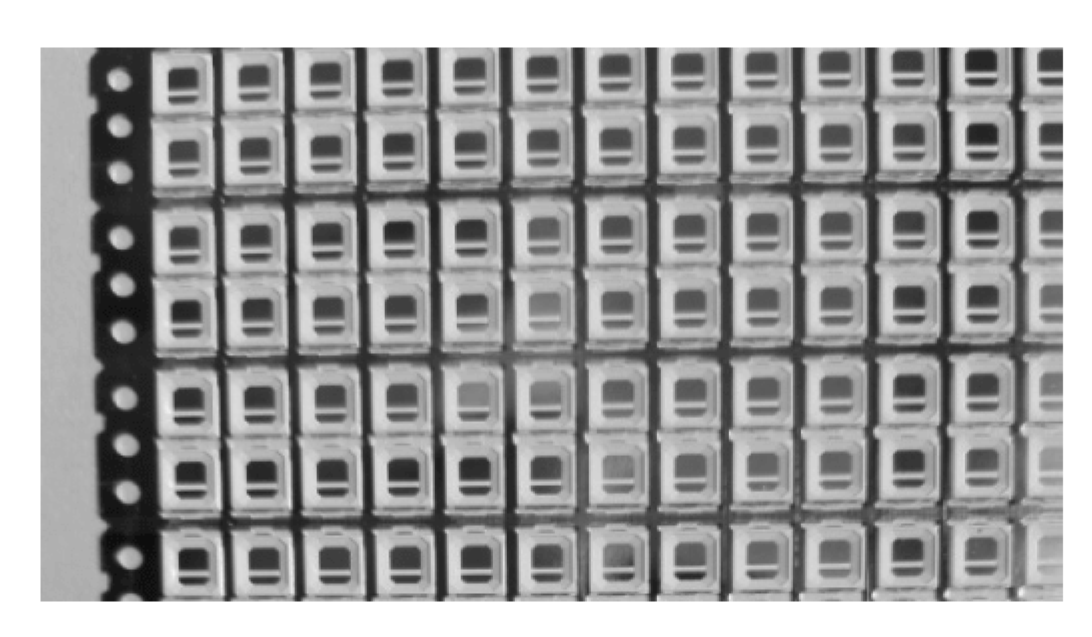


图 4-4　TOP 型支架

PCB 片式支架是指使用印刷电路板(printed circuit board，PCB)作为芯片管座，常用的板材有 FR-4、BT 等。FR-4 型 PCB 板是在环氧玻璃布层压板上覆铜电路层，具有较高的机械性能和介电性能，耐热性和耐潮性、机械加工性均较好，是常用的 PCB 板。BT(bismaleimide triazine)板是在 BT 树脂基板材料上覆铜电路层，具有很高的玻璃化温度、良好的介电性能、良好的力学性能和低的热膨胀率，在高密度互连(HDI)多层印制板和芯片封装用基板中得到广泛的应用。用于片式支架的 PCB 板电路层需要在铜箔上电镀亚微米至微米的镍银或金，以方便后续的引线键合，并通过钻孔后电镀铜填孔或挖槽后电镀铜互联内电极(连接芯片处的电极)与外电极。一种 PCB 片式支架的照片见图 4-5，常用的型号有 3216、2014、1608 等，如 1608 表示支架长宽尺寸为 1.6×0.8mm。

SIDEVIEW 支架是一种用于侧面发光 LED 的支架，用于小尺寸液晶显示屏背光源。SIDEVIEW 支架的结构与制作方法与 TOP 型支架相同。常用的型号有 008、010、108、206 等，008 支架的尺寸为 4.50(l)×1.25(w)×0.88(h)，010 支架的尺寸为 3.7(l)×0.9(w)×0.43(h)，108 支架的尺寸为 2.85(l)×1.20(w)×0.80(h)mm，206 支架的尺寸为 3.8(l)×0.62(w)×1.0(h)。一种 SIDEVIEW 支架结构如图 4-6 所示。

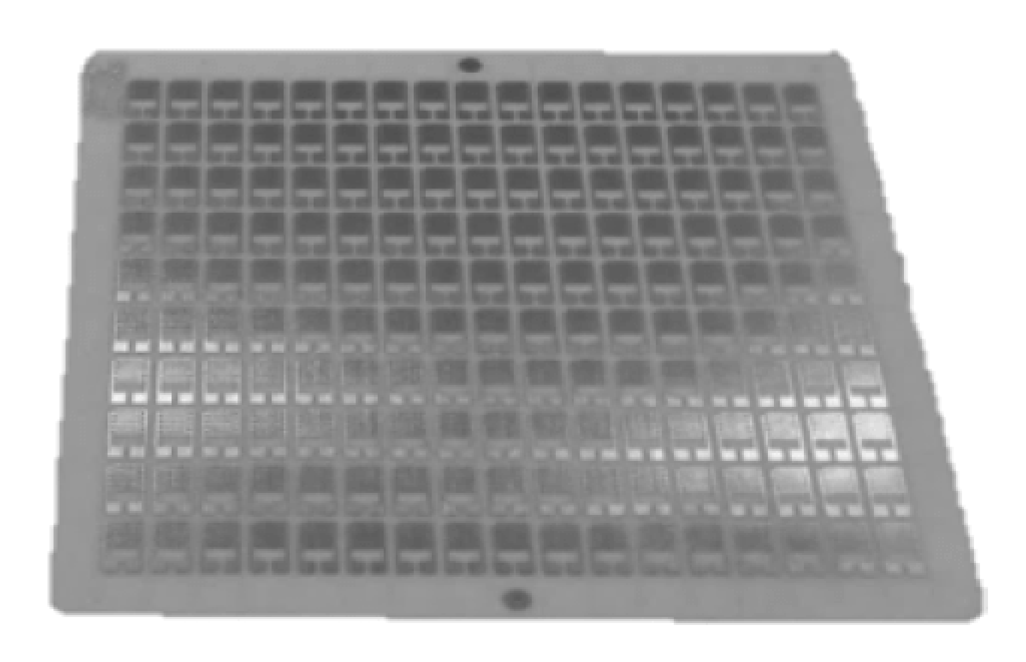


图 4-5　PCB 片式支架

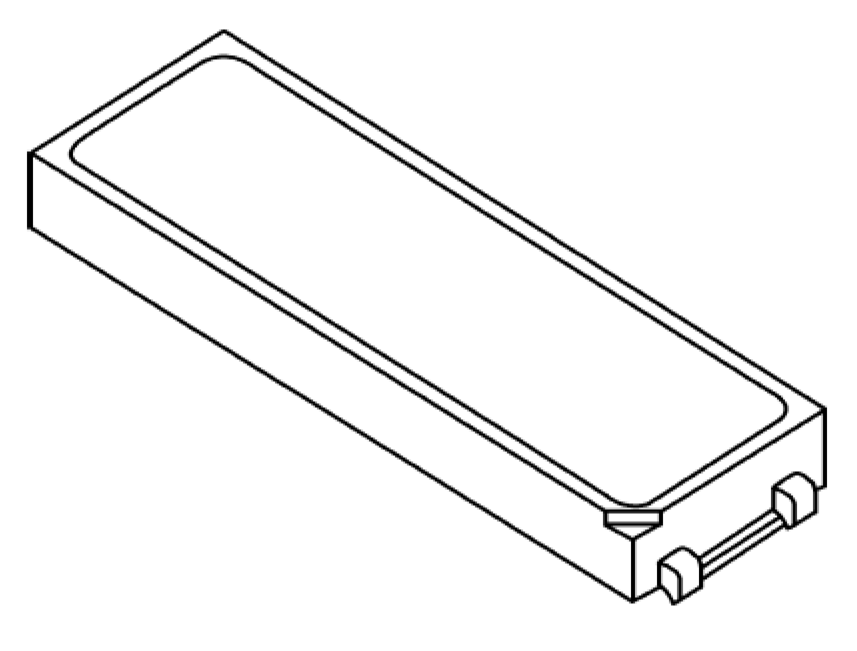


图 4-6　SIDEVIEW 支架结构

2．大功率 LED 支架与基板

一般称电功率 0.5W 以上的 LED 为大功率型，其支架与基板选择需要满足的条件为：良好的电气绝缘、热导率高、机械强度高、热膨胀系数与 LED 芯片材料相近、与其他辅助材料性能兼容、化学稳定性良好、成本低。上述许多要求是相互矛盾的，如导热率高的材料大多为金属，所以，导热率高的材料绝缘性能差，反之亦然。这就要求在制作支架时应选用两种或多种性能相异的材料互补（如改良型 TOP 支架、普通 PCB 基板上的导热过孔等），或是对原来的材料进行处理（如在金属基板上制作绝缘层，或在绝缘陶瓷基板上制作金属电路层）。表 4-1 为常见电路板的物理性能。除了考虑支架和基板材料的物理性能外，也要对其表面形貌有所考虑，比如表面的粗糙度、翘曲度等指标。前者将对封装的热阻、光效产生影响，后者将对封装工艺产生影响。

表 4-1　常见电路板的物理性能

Item	LTCC 低温共烧多层陶瓷	HTCC 高温共烧多层陶瓷	DBC 直接接合铜基板	DPC 直接镀铜基板	铝基 PCB 板
工艺温度/℃	850～900	1300～1600	1065～1085	250～350	250
线径宽度/μm	150	150	150	10～50	30～100
热传导率/W/(m·K)	2～3	16～17	Al_2O_3：20～24 AlN：130～200	Al_2O_3：20～24 AlN：170～200	*0.2～2.0
线路制作方法	厚膜印刷	厚膜印刷	厚膜光刻	薄膜光刻	光刻

*绝缘介质层。

1）改良 TOP 型

是一种基于 TOP 型支架结构的大功率 LED 管壳，包括单管型和模组型。

为提高热传导能力，将独立的柱形热沉焊接或冲压在 TOP 支架芯片电极 PAD 之下，多用纯铜，直径 1～2mm，最后与 PPA 或 EMC 模料射出成型熔铸为一体，电镀镍银。由于铜的热导率高、散热通道很短，支架热阻较小，在 5K/W～20K/W 范围，用于 1W 及以上的功率型 LED 封装。

改良型模组 TOP 支架是指为进一步提高热传导能力，满足多芯片 LED 模组的技术要求，将尺寸 $10\times10mm^2$ 以上的铜基板热沉与金属支架焊接或冲压连接，最后与 PPA 或 EMC 模料射出成型熔铸为一体，电镀镍银。金属具有很高的热导率及较低的价格，如纯铜的热导率高达 397W/(m·K)，金属基板基 MCM 封装的大功率 LED 组件成为一种重要的流行封装方式，主要用于集成化 LED 路灯等模组，其功率从几十瓦至百瓦级。由于该类支架热沉良好的导电性，只能选用绝缘衬底 LED 芯片及片上键合引线工艺。

2）氧化铝和氮化铝陶瓷基板

用于 LED 的陶瓷基板多为氧化铝（Al_2O_3）材料，其导热性能与 Al_2O_3 的含量相关，如含量 99%以上称为 99 瓷，室温下的热导率可到 31.4W/(m·K)。传统的氧化铝陶瓷基板多采用流延成型、高温烧结工艺，具有工艺简单、成本低的特点，适合于工业化生产。也可采用粉末压制法制备基板。在其上采用厚膜印刷银钯、高温烧结制出金属电路层，其工艺的特点是设备投入少、工艺简单、成本较低。但是，也具有电路层厚度较厚（约 20μm

以上)、电阻率较高、浸润性一般、粗糙度差等缺点,一般用于对粘接工艺或对焊接质量要求不高的场合。此外也可采用薄膜工艺在陶瓷基板上溅射铬(镍、钛)铜薄层,再电镀厚铜及金(银)制出电路层。薄膜工艺制出的电路层的粗糙度、平整度和浸润性更好,更适合于芯片焊接工艺。

若需要更高热导率的陶瓷基板,可以选择氮化铝(AlN)材料,室温下的热导率最高可达 270W/(m·K)。其上电路层的制法与氧化铝类似,但是为了获得更牢固的电路层,需要配制专门的金属浆料。多用于汽车前灯等大功率 LED 的封装。

由于陶瓷基板具有较高的热导率,特别是它的热膨胀系数与半导体材料相近,封装过程产生的热应力很小,是制作大功率、高质量、高可靠 LED 器件的主要基板。

3) 低温共烧陶瓷基板

前述氧化铝、氮化铝陶瓷基板的烧结温度在 1500～1900℃,若要与电路层涂层布线共烧的话存在许多问题,如线路电阻率、热膨胀系数匹配等。为了解决上述问题,并实现多层布线,在氧化铝陶瓷粉料中掺入 50%以上的硼硅酸铅玻璃等粉料,使得烧结温度降为 950℃以下,这样就可以与低电阻率的 Au、Ag、Ag-Pd、Ag-Pt、Cu 等金属浆料在大气条件下实现精细布线与共烧。低温共烧陶瓷(low temperature co-fired ceramics,LTCC)基板具有工作频率高、电阻率低、电路布线精密(线条宽度小于 50μm)、与半导体材料热膨胀系数匹配、可以多层布线、可集成无源电子元件、体积小等优点。但是,玻璃料的掺入也大大降低了热导率(仅为～2.5W/(m·K))。该类基板制出的 LED 管壳多用于中小功率、高可靠要求的 LED 器件。为了弥补这一缺陷,可以通过在基板 LED 芯片位置打数个过孔并金属化的方法来解决。

4) 低温共烧金属陶瓷基板

为了解决 LTCC 基板热导率低的问题,开发了低温共烧金属陶瓷(low temperature co-fired ceramics on metal,LTCC-M)基板,即将做有线路涂布及微孔连线的陶瓷玻璃流延片平置于金属基座上压紧后一起低温共烧成型,常用的基座金属为与半导体材料热膨胀系数匹配的钨铜合金。该类基板可用于 MCM 大功率 LED 阵列模组的封装。

5) 铝基 PCB 基板

铝基 PCB 基板简称铝基板, LED 领域多用单层板,它由三层结构组成,分别是电路层、有机介电绝缘层和金属基板,其结构见图 4-7。电路层使用 30～100μm 的铜箔,有机介电绝缘层使用掺杂高导热绝缘陶瓷粉粒的环氧树脂,金属基板多采用 6061 等铝板,也有铜板或铁板。制作工艺为:将导热粉末与环氧树脂均匀搅拌涂覆于铝板上,然后将铜箔在真空环境下热压在树脂上。绝缘层是铝基板最核心的技术,主要起到粘接、绝缘和导热的功能。铝基板绝缘层的热导率多在 0.4～2.5W/(m·K),厚度多在 40～120μm,耐

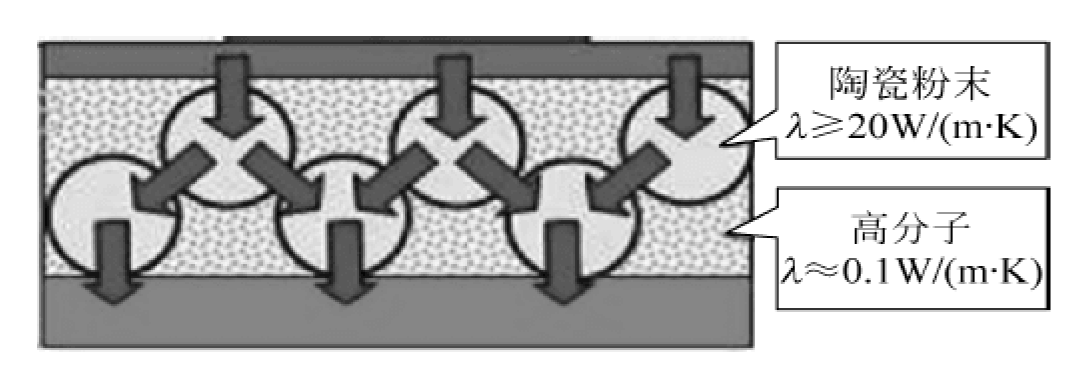


图 4-7　铝基板结构示意图

压可达 2000V 以上，但该层是铝基板的热障。与传统的 FR-4PCB 板比，铝基板的热阻更低、导热性更好、可以承受的功率更大；与陶瓷基板相比，它的机械及加工性能更为优良、成本更低。但是，铝基板绝缘层为有机高分子材料，耐高温性能差，多次的高温焊接及长期的高温工作会改变该层的物理性能，降低可靠性。

6）其他基板

可用于 LED 封装及光源模组的其他基板还包括

（1）在铁质基板上烧结珐琅陶瓷层，之后采用厚膜工艺在陶瓷层上制作电路层，该方法膜层牢固，工艺成熟，但热阻较高；

（2）对铝板硬质氧化或微弧氧化处理，在铝板上原位生长氧化铝陶瓷绝缘介电层，之后在陶瓷层上使用厚膜或薄膜工艺制作电路层。该方法的优势是可以获得大面积、较薄且均匀的氧化铝陶瓷层，机加工性能优良。但是需要进行特殊的封孔处理，否则耐压特性不佳；

（3）在铝或铜基板上溅射 AlN 绝缘介电膜层或化学气相淀积（CVD）金刚石绝缘介电膜层，之后在介电层上使用薄膜工艺制作电路层。该类基板可以获得最好的导热特性，但是膜层与金属基板的牢度较差、成本很高。

3. 导电胶和焊料

导电胶和焊料用来将 LED 芯片粘接或焊接至支架、基板的相应电极垫处，强化芯片的强度，也可实现电气连接，是实现 LED 互联技术的基本粘接材料。

1）导电银胶

导电银胶由粘接剂、溶剂、导电填料和固化剂构成。粘接剂多采用环氧树脂，它的固化物致密、粘接力强，但耐热性有限。溶剂的作用是稀释胶体便于涂覆，常用无水二醇乙醚、酮类、甲苯及二甲苯的混合物作为溶剂，过多的溶剂将造成树脂与导电填料的分层。导电填料的作用是导电，常用的导电填料为亚微米级银粉，其直径不大于 0.3μm，纳米级银粉也开始用于导电胶，加入量可达环氧树脂的 2～3 倍以上。固化剂的作用是固化环氧树脂胶体，常用的固化剂为酚酮树脂、乙二胺、间苯二胺、邻苯二酸酐、均苯四甲酸二酐等。国产 DAD-87 导电胶是一种电子封装、光电子封装常用的贴片胶，室温下的粘接强度高于 4MPa、体电阻率约为 $10^{-6}\ \Omega\cdot m$、玻璃化温度为 99℃、热导率可达 14.58W/(m·K)、热分解温度达到 341℃（失重 1%），200℃/2h 即可固化。它是目前用量较大的功率型 LED 芯片的固晶胶体。需要注意的是导电银胶对可见光有较高的吸收率。

2）焊膏

LED 芯片封装中常用的焊料为软钎料，也叫易熔钎料，由于环保的要求，含铅的软钎料已经不允许使用。为了使用方便将钎料合金粉、焊剂、溶剂和运载剂等混合一起制成焊膏，LED 封装中应使用电子级焊膏。合金粉是焊膏的主要成分，对焊膏的性能影响显著，合金粉以球形为好，因其表面积最小，且点胶或丝网漏印时顺畅，一般尺寸 200 目以下。焊剂（助焊剂）和溶剂可以在清洗焊接面的同时还原合金粉的氧化物，提高焊接质量，其中不应含有氯等导电离子，也不可以对焊接面产生腐蚀。运载剂的作用是调整焊膏的黏滞性，保障悬浮的合金颗粒不沉淀、焊料熔化过程均匀、不飞溅、不外溢。常用的无铅金属合金粉末包括 SnAgCu、SnSb、SnSbCu 或 SnSbAg 球形金属合金粉末中的一

种。助焊膏由树脂20%～40%、溶剂40%～50%、有机酸5%～8%、表面活性剂4%～5%、触变剂3%～5%、抗氧剂1%～3%、合成活性剂1%～3%(重量百分比)等成分组成,它使固晶时间更短、性能更稳定、对金层的润湿性更好、气孔率更低。要求膏体均匀细腻、无异味、触变指数高。

一种用于LED芯片焊接的免清洗型96.5Sn3Ag0.5Cu焊膏的主要成分如表4-2所示。

表4-2　96.5Sn3Ag0.5Cu焊膏的主要成分

应用特征	IPC合金粉类型	合金粉尺寸/μm	合金粉含量/%
标准印刷	3	25～45	89
细间距印刷	4	20～38	88.5
滴注	3	25～45	85

主要指标如下:

(1) 黏度:200±20 Pa.S (Malcom Viscometer:10rpm @ 25℃)。

(2) 锡球:符合测试标准J-STD-005、IPC-TM-650、Method 2.4.43。

(3) 湿润性:符合测试标准J-STD-005、IPC-TM-650、Method 2.4.45。

(4) 熔化后热导率:67W/(m·K)。

(5) 熔点:220℃。

其使用条件是:

(1) 温度21～27℃,湿度35%～65% R.H.。

(2) 表4-3所示的回流焊温度曲线。

表4-3　回流焊温度曲线

升温速度	到达120℃所需时间	恒　温 130～170℃	峰值温度	>220℃	冷却速度
1～3℃/s	<60～90s	60～120s	<245±5℃	<40～80s	<4℃/s

3) 共晶焊料

共晶焊是一种有别于软焊接的电子产品焊接技术,当两种或多种不同的金属按照一定的重量比例形成合金后,其合金的熔点比原来的单体金属低,而且合金的延展性、硬度、脆性等物理性能也发生变化。典型的共晶焊料包括:金-硅系、金-锡系、金-银-硅系等。图4-8为最常用的金-锡二元合金相图,由图可见在金锡重量比接近20%处有一278℃的共晶焊接熔点,当金锡重量比超出该点后,熔点温度迅速升高,称此类合金为80Au20Sn,其热导率约为57W/(m·K)。目前,多把金-锡共晶焊料溅射或电镀在芯片电极或者陶瓷热沉电极上,形成厚度约为3μm的金-锡合金焊料层,要求电极外层必须为金层。共晶焊接后,电极金层的部分金熔汇至共晶焊料层,改变了金-锡比例,熔点大幅升高,提高了可靠性。共晶焊的质量与焊接温度、气氛、压力密切相关。共晶焊是目前封装质量最高的工艺手段之一,多用于半导体激光器(laser diode,LD)的贴片焊接,也用于诸如汽车前照灯光源等高端LED的贴片焊接。

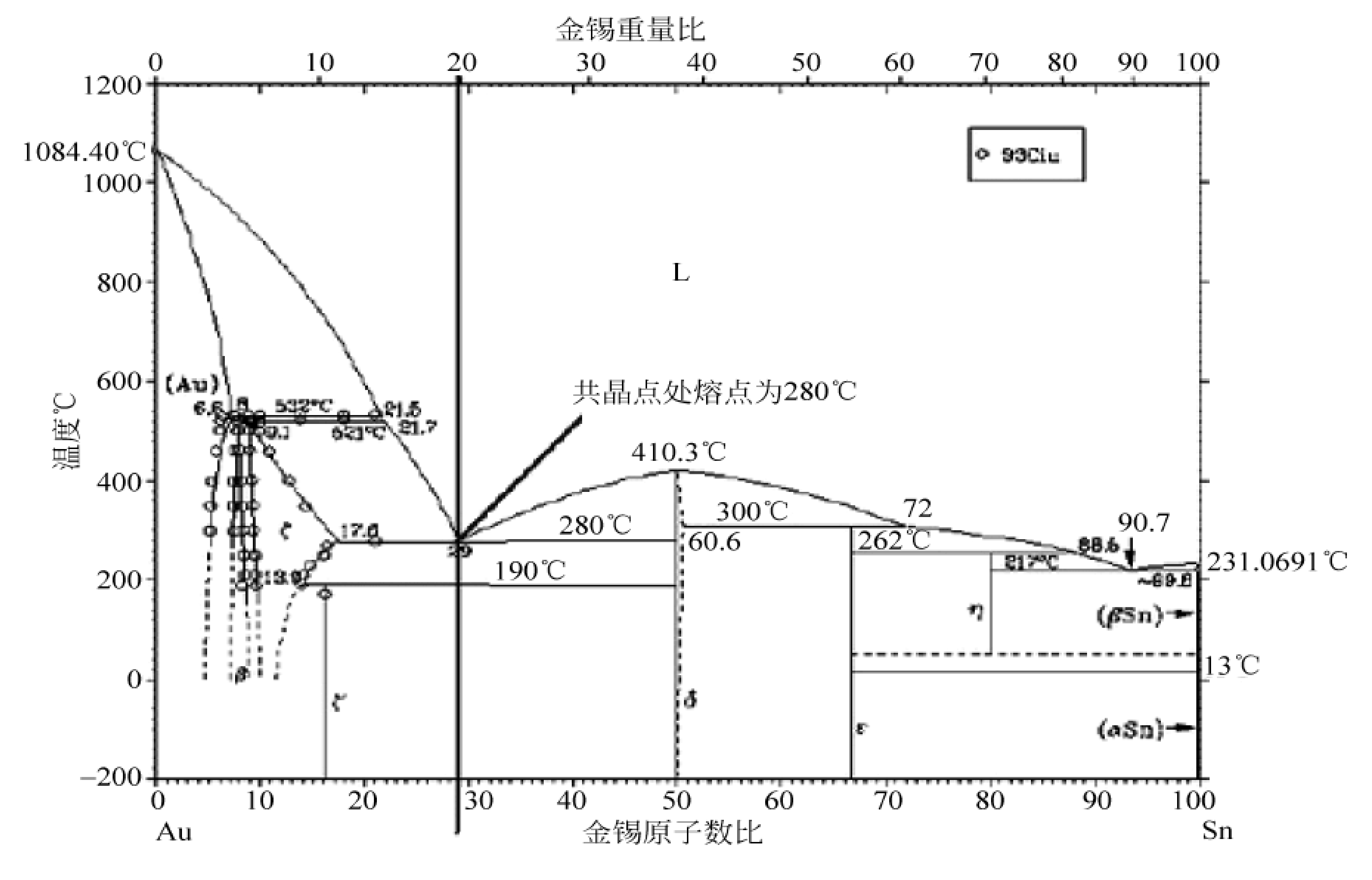


图 4-8 金-锡二元合金相图

4. 光学胶水

光学胶水主要用于 LED 顶部透镜、包封，也可用于小功率 LED 芯片的贴片，主要包括环氧树脂类和硅胶类。其作用为完成封装中保护 LED 芯片免受外部环境破坏(阻挡潮气侵蚀、阻挡有害污染离子的扩散)延长使用寿命的功能，同时还是 LED 的出光窗口。要求光学胶水必须具备以下特点：

(1) 与支架或基板材料附着性良好，形成致密的连接；

(2) 低的热膨胀系数，与支架或基板材料匹配；

(3) 高的热稳定性、较高的机械强度，确保长期工作的可靠性；

(4) 高的、稳定的透光性；

(5) 用于户外产品的，还需要较强的抗紫外线能力。

1) 环氧树脂

LED 封装用的主要为双组份双酚 A 型透明环氧树脂，A 组分由双酚 A 型环氧树脂 96%～98%、活性稀释剂 1.6%～3.6%、透明蓝紫染料色浆 0.02%～0.10%、脱模剂 0.05%～0.13%和消泡剂 0.08%～0.18%等组成，B 组分由固化剂 98%～99%、促进剂 0.2%～0.8%和抗氧化剂 0.01%～0.09%等组成。使用时按照 A 组分：B 组分＝1.0：(0.9～1.0)的重量比例，将两者混合均匀即可。透明蓝紫染料色浆用于中和环氧树脂的黄色。封装胶中内含脱模剂，能使固化成型的最终封装制品脱模更容易。与硅胶相比，固化后环氧树脂的强度更高，可以承受一定的压力，主要用于直插式 LED 的包封与透镜成型。由于许多封装后的 LED 器件用于户外显示、照明，紫外线会加速环氧树脂胶体的老化，变黄后的透光性变弱、包固强度变差甚至与支架剥离。为了提高抗紫外性

能、维持持续的透光率，可采用邻羟基二苯甲酮类、苯并三唑类和受阻胺等光稳定剂，对其改性，改性后的胶体可以明显提高 LED 的寿命，透光率维持在 95%左右。

为了提高环氧树脂的综合性能，如提升刚性、调整热膨胀系数、提升耐紫外性能等，通常可在环氧树脂中添加部分无机材料粉末，如 SiO_2、Al_2O_3 等。

2）硅胶

硅胶是 LED 封装中一种最为重要的液态有机封装材料，主要为双组分液态硅胶，它属于室温硫化型，A 组分的成分包括 VMQ 线性液态聚合物、填充料、交联剂和其他特定添加剂，B 组分的成分为催化剂。使用时按照厂家提供的 A 组分与 B 组分的重量比例将两者混合均匀、脱泡处理后即可使用。与环氧树脂胶体相比，固化后的硅胶呈弹性体，可在玻璃、金属、陶瓷、塑料等之间形成良好的密封，同时有效去除支架或基板与胶体间的应力应变，使之可在－65℃～200℃温度范围内长期可靠的使用。此外，它的透光率高，耐水、耐臭氧、耐气候变化，无腐蚀、无毒无味、收缩率低，其高的折射率可以提高 LED 的光引出效率。一般用于表面贴装（surface mounted devices，SMD）LED 灯珠的灌封、透镜成型。

5. 底胶

底胶也叫填底胶，主要用于倒装芯片贴片后的填底，即使用此胶水填满倒装芯片与支架或基板间的空隙，将芯片、基板、焊垫固定为一体，大大降低了芯片与基板热膨胀系数差异造成的热应力，提高贴片可靠性，同时降低了贴片热阻。填底胶水的流动性和附着性应该非常好，因为需要在最短的时间内利用毛细现象填覆倒装芯片与基板之间的空隙。填底胶的最小填充间隙尺寸为 10μm。

填底胶已经广泛用于倒装 IC 芯片封装工艺，随着倒装 LED 芯片的普及也将用于倒装 LED 的封装。需要注意的是，若反光层仅做在基板电极处，则要求填底胶具有较高的透光性。

典型填底胶的成分以环氧树脂为主，其黏度不高于 0.3Pa·s。

6. 键合引线

键合引线的作用是将芯片电极与支架电极互连，完成电气连接。由于芯片电极垫多在 70μm 左右，考虑到键合后的压点尺寸及键合可靠性，故键合引线的直径需要与垫匹配。按照线径分，常用规格有 0.8mil、0.9mil、1.0mil、1.2mil、1.5mil 等，使用最多的是线径 1mil（ϕ25.4μm）。按照线材分，包括金丝、铝丝、铜丝、合金丝等，金丝是综合性能最佳的键合引线，但是成本最高，其纯度达 99.9%，内含少量的硅。为降低成本，合金键合引线是近年发展起来的新型键合线，多在铜丝外部镀钯银，或在银丝外部镀钯金，在不做键合工艺改变的提前下就可代替金丝，成本显著降低。直接使用铜丝键合的研究一直在进行，并取得了很大的进展，但是，需要对引线键合设备和工艺做较大的调整，如需要增加氮气氛保护装置等，还未全面普及。上述键合线均可适用于热超声球焊工艺，铝丝仅适合于超声键合工艺。常用键合引线的主要参数及应用见表 4-4。

表 4-4　常用键合引线的主要参数及应用

引线材料	主要成分	延伸率①/%	断裂负荷/cN	热导率/W/(m·K)	电阻率/μΩcm	熔断电流/A②	其　　他
金线	99.999%金	2～7	8	296.1	2.3	1.04	高端封装
银线	99.999%银	5～10	9	418.7	1.62		与金丝工艺兼容
银金合金	银：金＝79：21	7～9	18	—	1.74	0.59	与金丝工艺兼容
铝线	—	—	—	—	—	—	常温超声键合
铜线②	99.999%铜	—	—	396.4	—	—	硬度大、焊点需加厚，氮气氛保护键合、气密保存

注：① 线径为 1.0mil。
② 包括纯铜及镀钯纯铜线。

7. 荧光粉

目前最常用的黄色荧光粉是 1996 年由日本日亚公司首先研制出的掺铈钇铝石榴石黄光荧光粉 $YAG:Ce^{3+}[(Y_{1-x}Gd_x)_3(Al_{1-y}Gd_y)_5O_{12}:Ce]$，其能级及发光原理图如图 4-9 所示。GaN 基 LED 辐射的 460nm 波长光子被 YAG:Ce3＋黄色荧光粉的 5d1 最低的位于 5.1eV 的激发态能级吸收，跃迁至低能态 4f1 时，发射波长为 580nm 的黄光。荧光粉的典型涂覆方法为将荧光粉与透明环氧树脂或硅胶混合均匀搅拌，利用点胶机将荧光粉胶体点至支架中 LED 芯片处。其优点是工艺简单，成本低。但是，由于荧光粉本身的粒径不同，造成在胶体内的沉淀速率不同而产生的荧光粉空间分布不均匀，最终造成白光 LED 的色温空间分布不均匀。为解决此问题，可以采用如电泳法(electrophoresis deposition，EPD)等工艺将荧光粉均匀地保型涂覆于 LED 芯片表面，大幅改善荧光粉空间分布均匀性，提高白光 LED 的色温空间分布均匀性。除黄色荧光粉外，用于蓝光 LED 及紫外 LED 激发的硅酸盐基与稀土基的红、绿、蓝荧光粉也在逐步实用化。

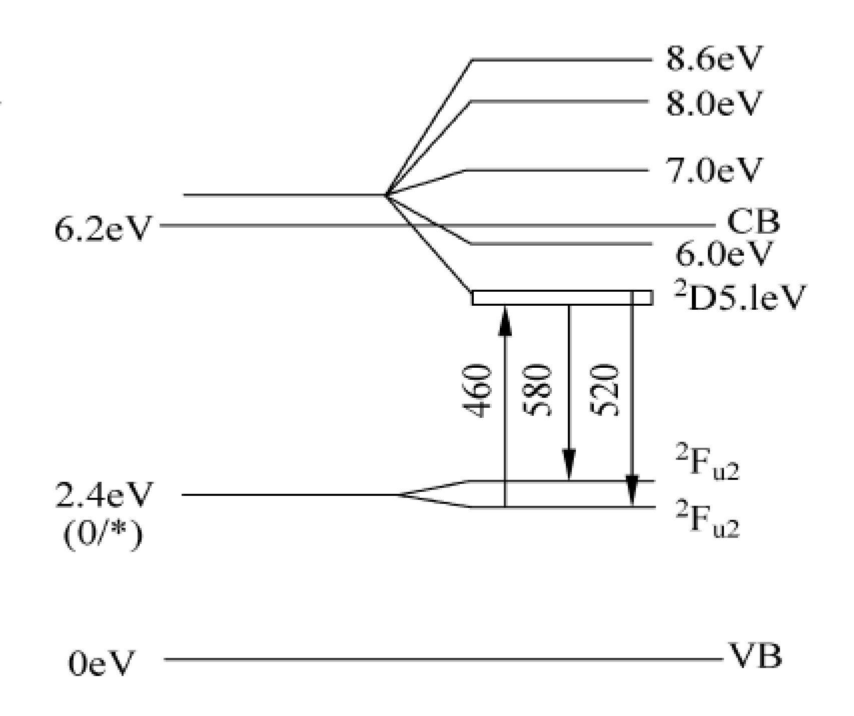


图 4-9　YAG:Ce3＋黄色荧光粉的能级及发光原理图

4.2.4　LED 封装基本工艺流程

以直插式红光 LED 器件的封装为例，其工艺基本流程如图 4-10 所示。

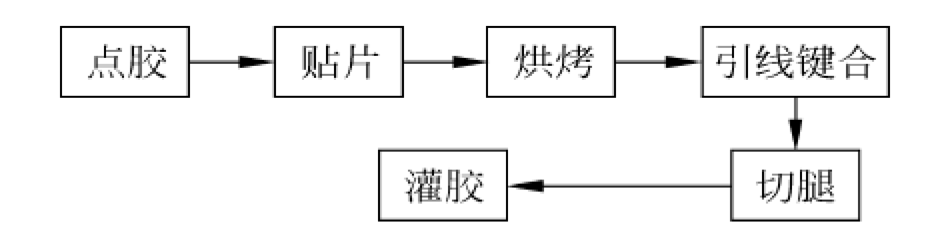


图 4-10　直插式 LED 器件的封装工艺基本流程

各工艺的主要目的如下：

(1) 点胶：将适量的导电胶准确点在支架LED芯片粘贴点处；

(2) 贴片：将LED芯片准确地粘贴到支架内电极垫位置；

(3) 烘烤：固化导电胶，将LED芯片固定于支架，同时实现芯片n电极与支架内电极的电气连接；

(4) 引线键合：使用键合引线将LED芯片p电极与支架内电极实现电气连接；

(5) 灌胶：将透明胶水灌进塑料模腔，支架芯片端插入模腔，烘烤固化胶水与支架为一体，脱模后形成透镜；

(6) 切腿：前述工艺均在支架框上完成，切腿后实现LED器件正负引脚的电气隔离；

(7) 分拣：将制出的LED器件送入分拣机按照设定的光强差、波长差、电压差进行参数分类分选；

(8) 包装：将分选后的LED器件包装后入库。

若为直插式白光LED的封装，还应在引线键合工艺后增加荧光粉涂覆工艺，即将荧光粉胶体涂覆在蓝色LED芯片周围，固化后再进行透明环氧树脂胶水的灌胶。

4.2.5 封装的基本设备

为完成封装工艺需要LED芯片固晶机、键合引线焊线机、点胶机、模塑机、烘箱、切割机、分选机、编带机等成套设备。

1. 固晶机

固晶机是完成LED晶片的检测、拾取、粘片(die bonding)等工艺的主要设备，分为手工刺晶台、自动贴片机两类。目前，手工刺晶台已被淘汰。图4-11为一种LED芯片自动固晶设备的照片，设备包括支架框送入、胶盘与点胶、芯片图形与质量识别、芯片对位拾放、支架框输出及图像识别、电气控制等部分。为实现LED芯片的准确定位、检测和分类，固晶机的图像识别系统的精度和速度、高速高精度运动部件是影响固晶机质量和性能的关键因素。先进的自动固晶设备已经具备全自动上下料、双工作台不间断工作、芯片及固晶质量自动记录等功能，贴片使用导电胶、焊膏或导热胶，贴片速度可达每小时20K以上，贴片精度可达25μm，贴片角度精度±3°。

2. 焊线机及引线键合原理

焊线机是完成LED芯片电极与支架内电极导线连接(wire bonding)的主要设备，分为手工焊线机、自动焊线机两类。目前，手工焊线机已被淘汰。超声焊线机主要由超声波发生器、PZT换能器、变幅杆、劈刀、加热装置、图像识别系统、运动和控制系统等构成。其结构与工作原理如图4-12所示。其中劈刀为中空、底尖的金属钨或陶瓷基质的平锥状柱体，内径略大于键合线直径，底尖直径与芯片电极尺寸接近，键合引线插入其中。工作原理为：PZT将超声发生器的超声能量转换为超声振动，经变幅杆传递至劈刀，同时给劈刀施加压力，将键合引线与芯片电极压紧，超声振动去除了键合线和电极接触层面的



图 4-11　LED 芯片自动贴片设备

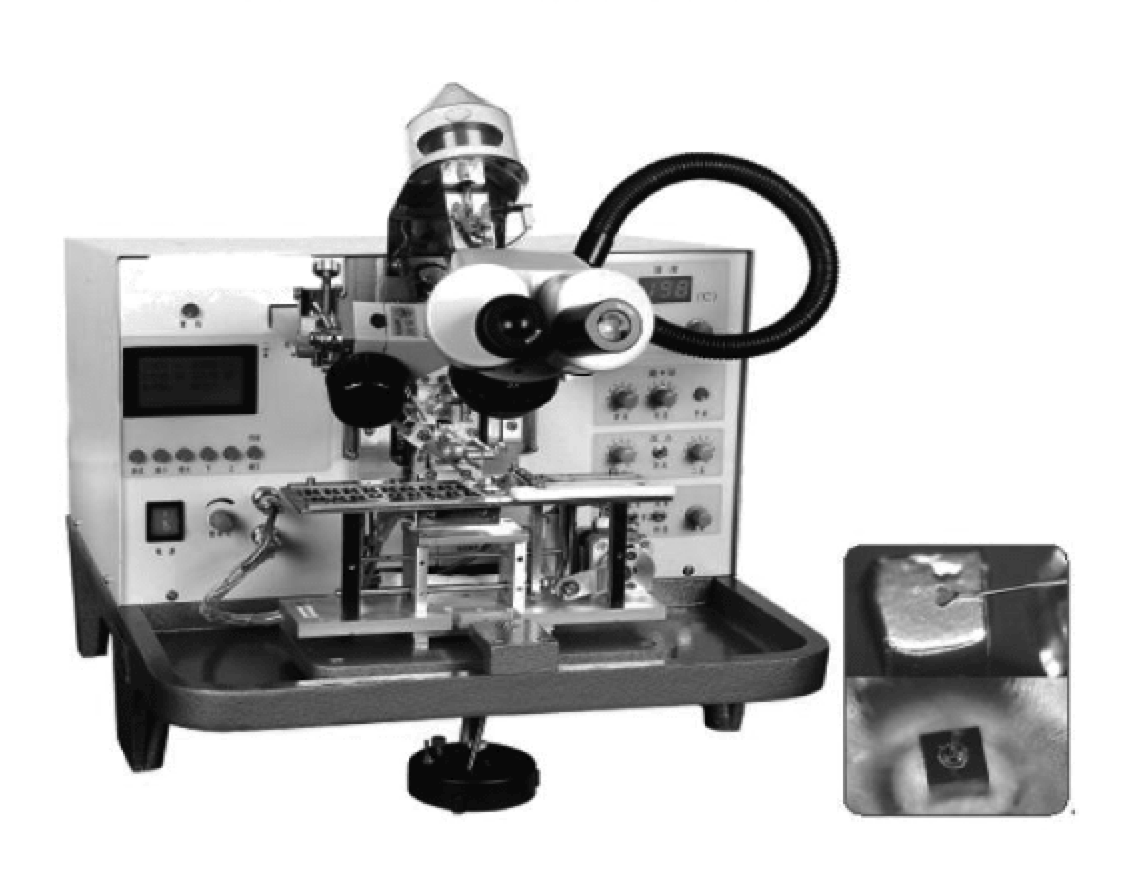


图 4-12　超声焊线机的结构与工作原理

氧化层及杂质，使得引线与芯片电极达到原子级别的紧密接触，并在接触表面生成了合金化合物，从而形成牢固的焊接。

金丝球焊工作原理如图 4-13 所示，完成第二个键合点的键合后，陶瓷劈刀附近的高压点火装置将键合金丝端头熔融为球状，在图像识别系统、运动和控制系统的作用下，劈刀对准芯片电极将金球压在电极垫处，同时施加超声波完成第一焊点的键合焊接，拉起劈刀运动至支架内电极焊点处，压下劈刀施加超声波完成第二焊点。注意第一焊点为球状，球径约为键合线径的 200%左右，第二焊点为条状，尺寸远大于第一焊点，图 4-14 为引线键合的显微照片。给键合点适当地加温能够促进金属原子之间的相互扩散，加快固相反应的速度。

根据焊线机理可分为超声焊线机、金丝球焊机，前者仅对劈刀施加压力和超声波，适合于容易氧化的键合铝丝的焊接，后者还要对焊接点施加一定的温度并在键合线末端烧球，适合于键合金丝、合金丝的焊接，由于第一焊点为球形压制的圆饼状，焊点尺寸小、形状规范、易于控制、不易和母材生成有害的键合中间物质，特别适合于高品质、高密度的引线连接。

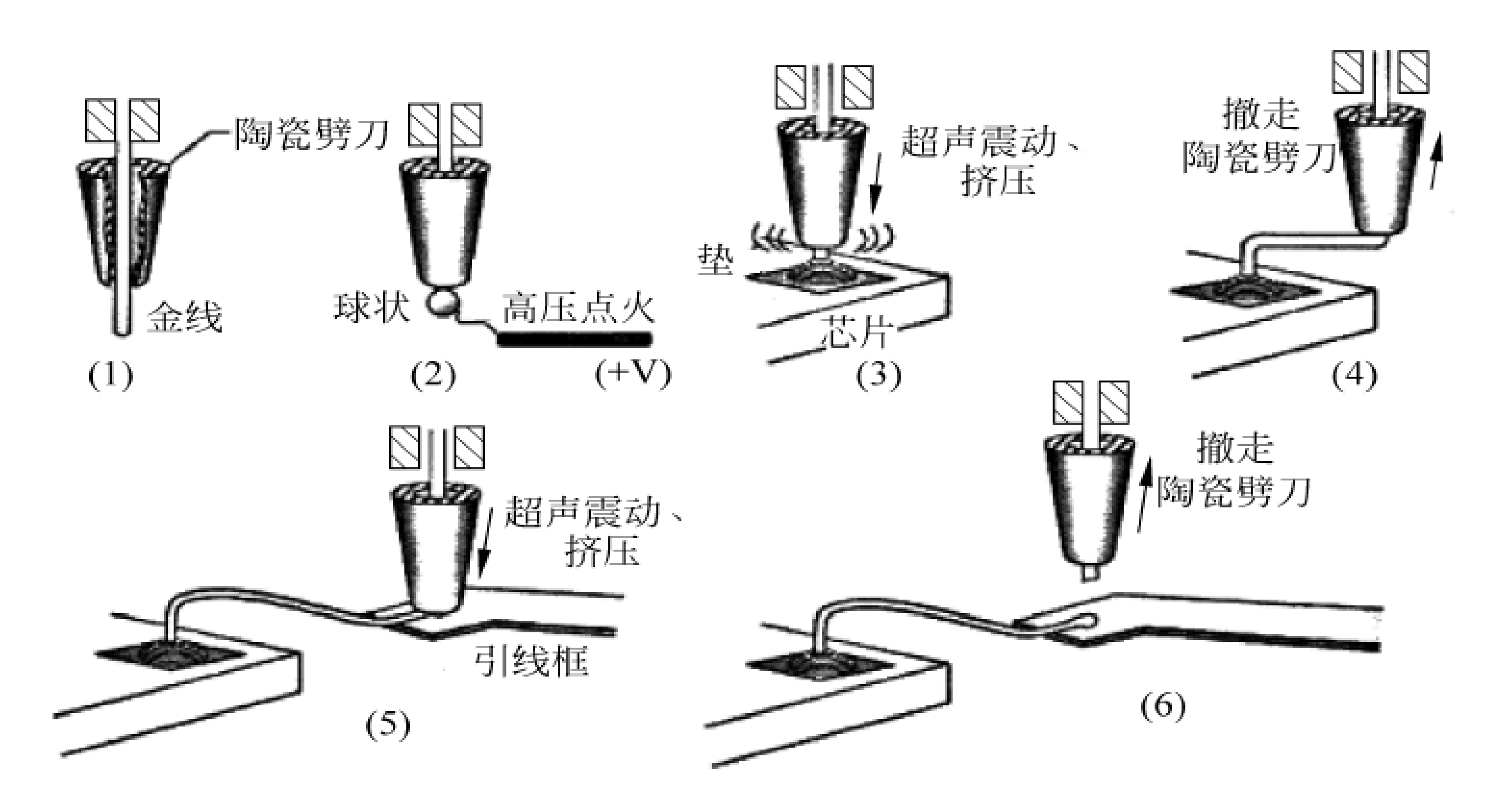


图 4-13　金丝球焊键合过程示意图

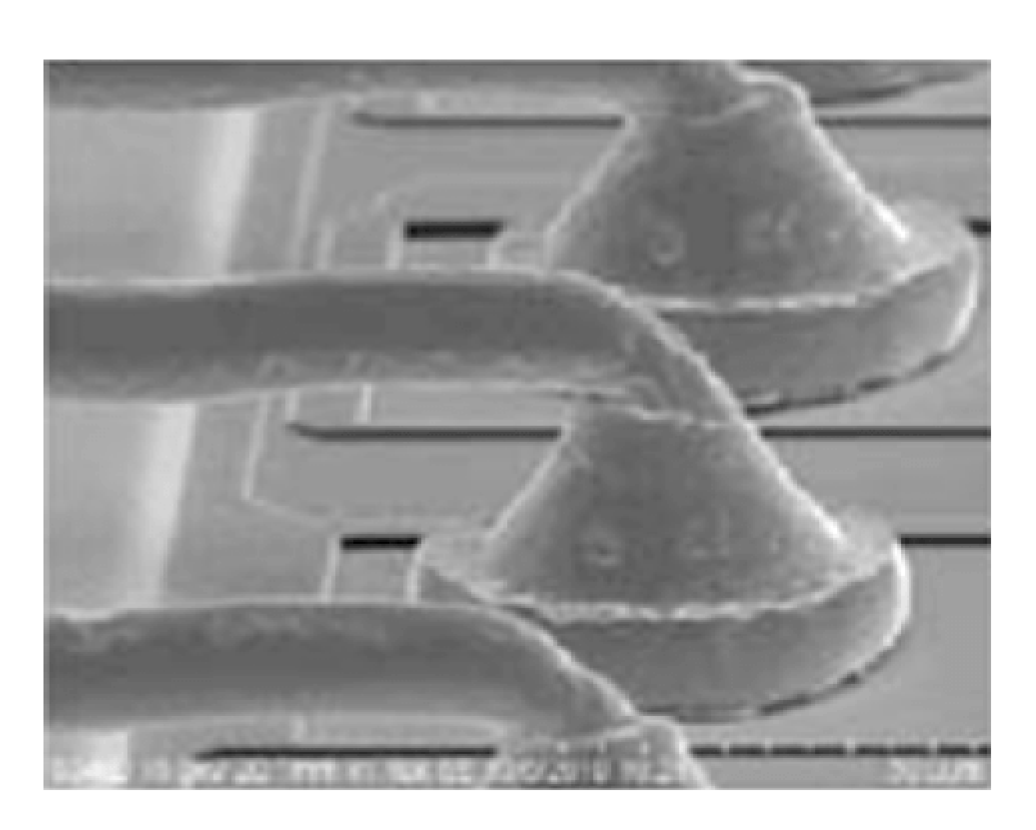


图 4-14　引线键合的显微照片

评价键合引线质量的指标主要包括：

(1) 焊点剪切力；

(2) 引线拉力，一般大于 4g 即为合格，高质量要求场合需要高于 8g；

(3) 线型，引线的形状柔和、高矮适当。

引线键合中需要注意：

(1) 引线材质应与母材相宜，最好为同种金属，如金丝焊接在金电极垫上为最佳，若不同，则应注意在实施键合的过程中生成的中间物不要影响键合点的可靠性，比如，铝丝键合在金电极垫处，长期工作会产生 $AuAl_2$(紫斑)和 Au_2Al(白斑)，这些化合物接触电阻大、脆，在振动或受力时极易发生断裂；

(2) 引线材质应与母材的金属互扩散要小，金属扩散导致金属原子的迁移，造成柯肯德尔空洞或裂痕，造成可靠性隐患；

(3) 键合点的尺寸一般不要小于键合线径的 130%，过小将降低剪切力和拉力；

(4) 对于金丝球焊工艺，通过仔细调整焊点温度、劈刀压力、超声能量可以在保证引

线质量的前提下改变焊点尺寸的大小，注意过大的超声能量可能会对芯片内部产生损伤，影响可靠性。

3. 激光划片机

对于金属支架的切割与分离均采用普通的机械切割设备，对于陶瓷基板可以采用砂轮划片机、激光划片机。由于采用对工件本身无机械冲压力的非接触加工方式，具有工件形变小、加工精度高、速度快等优点，使得激光划片机在半导体材料、陶瓷材料、特薄金属板材的切割和划片、打孔方面得到了广泛应用。

激光划片机是利用超小光斑尺寸、高能量密度激光束照射陶瓷等基板表面使照射区域局部物质快速气化而达到划片的目的。用于划片的激光光源有 YAG 固体激光器、光纤激光器、半导体激光器、二氧化碳气体激光器等，工作波长为紫外、532nm 可见光、808nm、1064nm 近红外和 10.6μm 远红外光，输出光信号有直流、脉冲两种方式。其中以紫外锁模模式的脉冲激光光源的划片效果最佳，划片光斑可以小至微米量级，划片速度可达 200mm/s 以上，但其成本高昂，如图 4-15 所示。选择激光划片机种类的主要原则是该激光器工作波长是否为待划片材料所吸收。



图 4-15　一种紫外激光划片机照片

4. 等离子清洗设备

在 LED 芯片、封装生产过程中，芯片、支架等物料不可避免地会被诸如油污、生产过程遗留物等物质玷污，也会氧化形成不需要的氧化层。这些玷污与氧化层将会严重影响产品质量或者为产品留下质量隐患。比如，电镀过程在支架基板的残留物将对芯片软焊接、特别是共晶焊接产生空洞等缺陷，软焊料中的助焊剂会带来腐蚀等问题；LED 芯片或支架在电镀、黏合、贴片操作时的残留物将会严重影响引线键合的牢固性，致使拉力减小甚至残留物腐蚀键合线焊点致使脱线等。

使用等离子清洗设备可以去除这些残留物有机氧化层。等离子清洗设备主要由反应室、射频电源、真空子系统、供气子系统、控制子系统等部分组成。工作原理为：将待清洗的物料(如 LED 外延片、支架等)放入工作室后抽取真空，由供气子系统注入少量工作

气体(如氧气、氩气、空气、氩气、氩氢混合气体、CF_4等)进入工作室,射频电源加电使工作气体发生碰撞形成等离子体,高活性的离子能量碰撞待清洗物体使其表面物质溅射,同时引起化学反应,等离子体中活性粒子的"活化作用"去除物体表面污渍或氧化层,获得浸润性强的新鲜表面。等离子体清洗包括无机气体被激发为等离子态、气相物质被吸附在固体表面、被吸附基团与固体表面分子反应生成产物分子、产物分子解析形成气相态、反应残余物脱离表面等几个过程。

清洗过程包括物理过程和化学过程。物理过程就是利用等离子体在物质表面的碰撞溅射物质表面分子使之脱离物质表面并在真空泵的辅助下排出等离子清洗设备外,由于氩气原子尺寸大,其离子的动能大,氩气是最常用的物理清洗等离子源。图 4-16 为一种等离子清洗设备的照片。化学过程是利用等离子体与待清洗物质表面材料发生化学反应产生非常小的、易挥发分子,在真空泵作用下脱离物质表面而达到清洗目的。化学过程常用氧原子作为离子源,因为氧离子与污染物反应生成的二氧化碳、一氧化碳和水容易被真空系统处理脱离待清洗物质表面。另外一种化学过程离子源为氢气,常与氩气混合使用。表 4-5 为等离子清洗与一般的化学清洗效果的比较。由此可见等离子清洗是效果最佳、最彻底、最容易控制的一种清洗方法。



图 4-16　一种等离子清洗设备

表 4-5　等离子清洗与湿法化学清洗效果的比较

等离子清洗	湿法化学清洗
工艺过程容易控制	时间和药剂成分、环境条件对清洗工艺影响大
一次清洗基本无残留物	一般需要多次清洗
反应副产品为气体,通过真空系统即可排除	反应副产品多为液体,需要进一步处理
工作气体大多无毒无害	大多数药剂和酸有毒有害

5．LED 分光分色机

在 LED 芯片的生产过程中，由于外延材料生长、器件加工等工艺的一致性差异致使生产出的 LED 芯片的光电参数（正向电压、发光强度、主波长等）也出现差异。使用荧光谱扫描成像系统（PL 谱扫描成像系统）可以快速检测出外延芯片的质量，通过逐点扫描可将外延芯片的光强、主波长、峰值波长、半峰宽等参数以云图形式显示出分布状态，如图 4-17 所示，从图中可以直观地通过不同的颜色看出外延片各个位置的发光强度等参数的误差。LED 封装过程中由于荧光粉涂覆的差异（如浓度变化等）也会使得 LED 器件的光色参数产生差异。上述差异在 LED 显示、背光、高质量照明灯具等应用中将对产品的最终性能产生极大的影响。

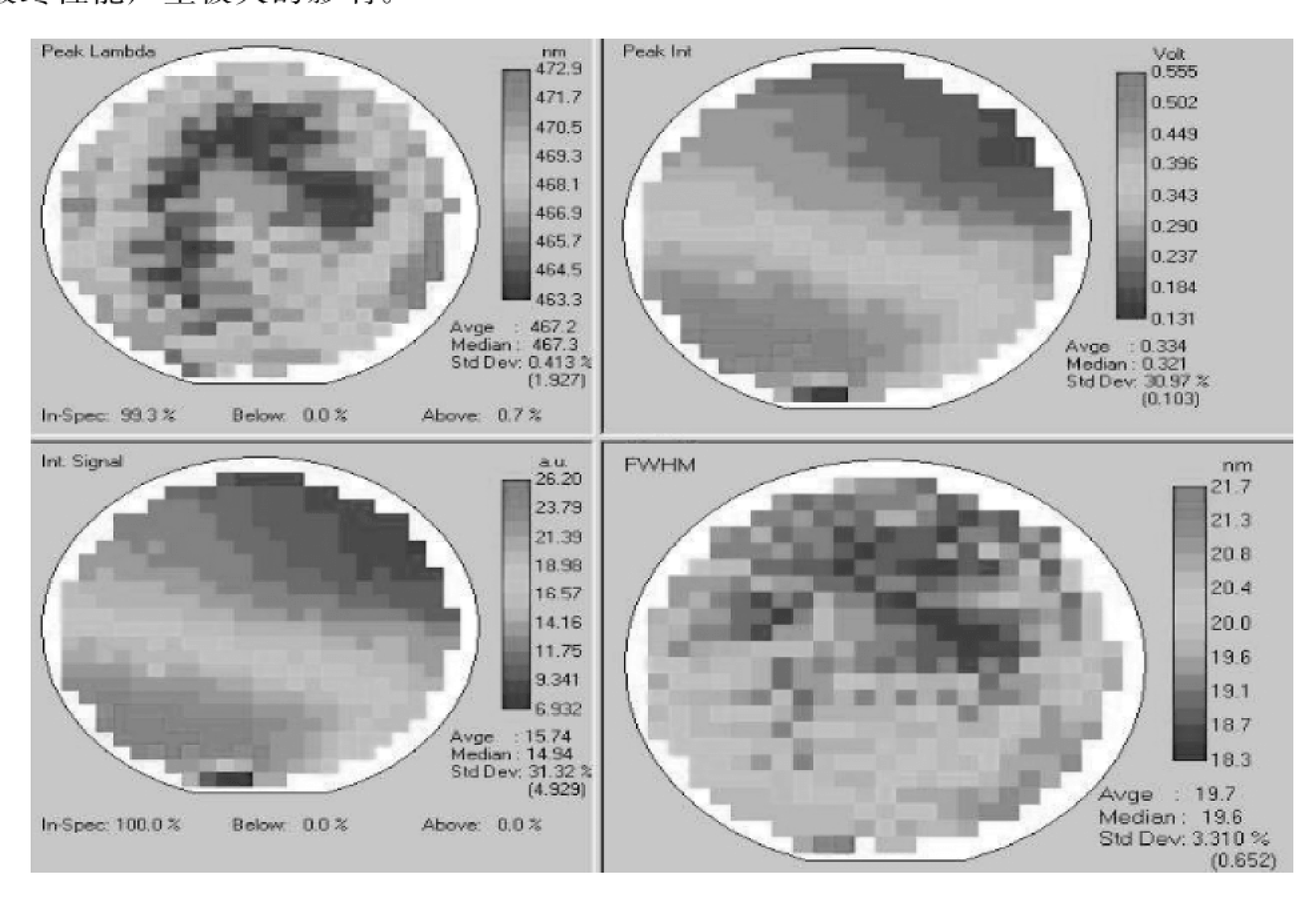


图 4-17　LED 芯片的参数云图

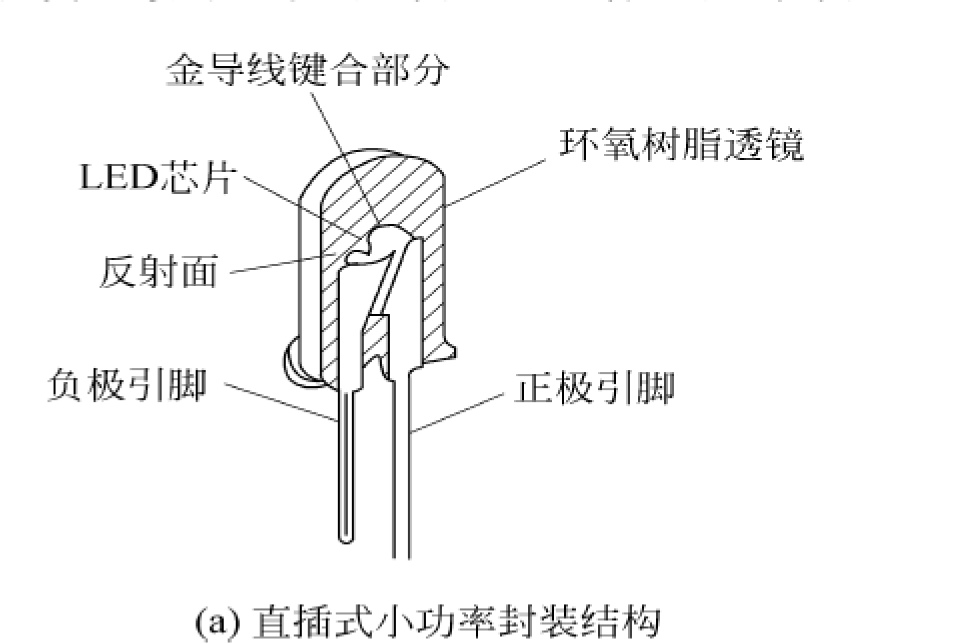
为了减小这种差异，在芯片生产和封装生产的末端均使用 LED 分光分色机。以 LED 器件分选机为例，它主要结构包括上料、测试分析、分选三部分。上料子系统是采用机械振动重力分选的方法将散装的 LED 器件整齐排列逐次进入测试子系统，自动探针压紧 LED 器件电极并加电测试其光色电参数，分选子系统按照事先划分的参数格子（bin code 或 rank code，即 LED 器件光、色、电参数的数值细分范围）将不同参数范围的 LED 器件送入不同的料盒完成分类。所以，业内常把 LED 器件分选机也叫分 BIN 机，如图 4-18 所示。



图 4-18　LED 器件分光分色机

4.2.6　封装的基本结构

LED 芯片技术的进步及不断发展的应用要求促进了 LED 封装技术的快速发展。目前，常用的封装形式包括直插式小功率、表面贴装小功率、大功率、集成式等多种封装形式。一种典型小功率 LED 封装结构和一种典型大功率 LED 封装结构如图 4-19 所示。由图可见，无论何种封装结构，封装的基本元素相同，包括 LED 管芯、管壳（支架、基板、热沉）、焊料（导电银胶、导热胶）、出光窗口（透明的环氧树脂、硅胶、PMMA、玻璃等制作的平窗或透镜）、电极引脚。管壳上制作出内电极和外电极，LED 芯片粘接在内电极（垂直结构芯片必须为导电胶或焊料）的阴极处或直接粘接在热沉中央（平面结构芯片可用导热胶），使用热超声球焊工艺将金丝键合连接芯片电极和管壳内电极，最后灌注成型透镜或粘接透镜形成出光窗口。当然，光学窗口也可以为硅胶填充的平面式结构。



(a) 直插式小功率封装结构



(b) 一种大功率LED封装结构

图 4-19　典型的直插式小功率封装结构和大功率 LED 封装结构

4.2.7 减小封装热阻的基本方法

减小 LED 封装热阻的基本方法如下。

(1) LED 芯片方面

① 缩短 LED 芯片有源区与主散热通道的距离,倒装芯片比正装芯片更易于散热;

② LED 芯片与主散热通道直接接触的面应进行必要的磨抛处理,减少贴片胶水的厚度;

③ 改善倒装 LED 芯片电极表面粗糙度(surface roughness)、平整度,减少共晶焊接或软焊料焊接工艺过程产生的空洞率(void content);

(2) 支架方面

① 改善金属支架、陶瓷支架、PCB 支架、TOP 支架内电极表面粗糙度及平整度;

② 若内电极同时作为热沉,则应选择热导率高的材料,同时尽量降低其厚度;若材料的热导率低,可以考虑通过制作"金属过孔"、置换部分高导热材料等方式减小主散热通道热阻;

③ 应确保支架贴片部分的"清洁",表面无油渍、无氧化、无与内电极金属无关的材料,有条件的可进行等离子体溅射清洗;

(3) 封装工艺方面

① 贴片胶水、导电胶、焊膏的黏度适中,点胶均匀不要过量;

② 贴片过程中,给予芯片的压力适中;

③ 高质量的共晶焊接过程中应该保证芯片维持一定的压力。

例题 4-1

如图 4-20 所示,使用透明环氧树脂将一 LED 芯片贴片至氧化铝陶瓷基板上,由于受陶瓷基板粗糙度的影响,LED 芯片与内电极的实际接触面积仅为芯片总面积 1(mm^2)的 5%,其他皆为环氧树脂填充。设芯片与基板的平均厚度为 20μm,温差为 10℃,环氧树脂的热导率为 0.2W/(m·K),氧化铝陶瓷的热导率为 20W/(m·K)。求封装中贴片部分的热阻。

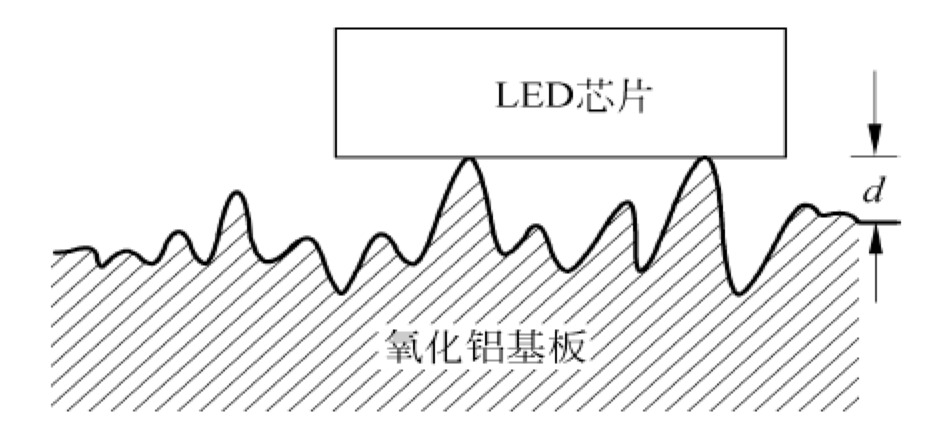


图 4-20 LED 芯片贴装在氧化铝基板上的贴片示意图

解 总热阻 R 由两部分组成,其一为 LED 芯片与陶瓷直接接触部分 R_c,其二为 LED 芯片与陶瓷未直接接触部分 R_{nc},两者并联即为总热阻。

$$R_c = \frac{20 \times 10^{-6}}{0.05 \times 10^{-6} \times 20}\text{K/W} = 20\text{K/W}$$

$$R_{nc}=\frac{20\times10^{-6}}{0.95\times10^{-6}\times0.2}\text{K/W}\approx100\text{K/W}$$

$$R=\frac{20\times100}{20+100}\text{K/W}=16.67\text{K/W}$$

若陶瓷基板粗糙度为较为理想的状态，即 LED 芯片与陶瓷基板有 90% 直接接触，则此时的贴片热阻 R' 为

$$R_c=\frac{20\times10^{-6}}{0.9\times10^{-6}\times20}=1.11\text{K/W}$$

$$R_{nc}=\frac{20\times10^{-6}}{0.05\times10^{-6}\times0.2}\approx2000\text{K/W}$$

$$R\approx1.11\text{K/W}$$

例题 4-2

为减少 PCB 支架的热阻，可采用在 PCB 板内电极上打微孔并镀铜封孔的方法。假设 PCB 支架内电极尺寸为 $1(\text{mm})^2$，厚度为 0.4mm，在其上均匀打 9 个微孔，微孔直径 0.2mm。试比较打孔前后 PCB 支架的热阻变化。

解 设 PCB 基板的热导率为 λ

(1) 未打孔时 PCB 支架内电极的热阻 R 为

$$R_c=\frac{0.4\times10^{-3}}{1\times10^{-6}\lambda}\text{K/W}=\frac{4\times10^{2}}{\lambda}\text{K/W}$$

(2) 打孔后 PCB 支架内电极的热阻 R' 为 9 个铜柱热阻与余下面积 PCB 板的热阻的并联，假设 PCB 板材料为环氧树脂，则铜的热导率大约是 PCB 板材的 2000 倍，所以，可以忽略 PCB 板材的热阻。

$$R'\approx R_{Cu}=\frac{0.4\times10^{-3}}{9\times\pi\times1\times10^{-8}\times2\times10^{3}\lambda}\text{K/W}\approx\frac{0.67}{\lambda}\text{K/W}$$

(3) 打孔后 PCB 支架的热阻较打孔前热阻减小了大约 597 倍。

4.2.8 LED 芯片焊接及新型粘接技术

互连技术的对象包括芯片与芯片、芯片与支架或基板之间的物理量连接，广义地讲也包括器件与基板之间的连接。前述使用固晶机的贴片过程、使用焊线机的引线键合过程均为最常用的的互连技术之一。在微电子和光电子封装中，互连技术对器件性能有着关键性的影响，特别是芯片互连对器件长期使用的可靠性影响很大，半导体器件失效中大约 1/4～1/3 是由芯片(引线键合)互连引起的。互连技术是微电子封装工程的四大关键技术之一。

目前，小功率 LED 芯片与支架的互连基本为透明环氧树脂粘贴，大功率 LED 芯片与支架或基板的互连多为导电银胶。全自动的 LED 固晶设备均支持胶粘贴片工艺，产能可以达到每小时 20K 以上。这些胶水的主体均为环氧树脂高分子材料，其固化物一般偏脆，抗剥离、抗开裂、抗冲击性能差，玻璃化转变温度较低(约 100～170℃)，高温工作性能较差。而且，环氧树脂类材料的热导率很低(约在 0.2W/(m·K))，胶水的黏度较高，贴片时胶水厚度不易控制的很薄，最终导致贴片层热阻较高。此外，这类导热胶、导电银胶

的固化需要在高温条件下长期烘烤，一般的导电银胶200℃时烘烤2小时方可完全固化，能耗大、工艺时间长、不可返修，短期反复的高温焊接或修复也可能造成环氧树脂性能的严重劣化。为了解决上述问题，可以使用钎焊等方法进行贴片。

1. 焊膏钎焊

钎焊是电子工程中最早采用的互连技术，是指需要连接的母材(芯片、支架)不熔化，在其间隙填充比母材熔点低、呈熔化状态的金属或合金，经冷却凝固而实现母材之间的互连。称这种金属或合金为焊料。钎焊分为硬焊(hard solding)和软焊(soft solding)，前者是指焊接温度高于450℃的钎焊，后者的焊接温度低于450℃，用于LED封装的均为软焊。理想的焊料应具备如下特点：

(1) 导电率高；
(2) 导热率高；
(3) 热膨胀系数与母材接近；
(4) 与母材的结合(bondable)力强；
(5) 长期使用无金属迁移(metal migration)和电迁移(electromigration)；
(6) 不容易发生扩散、氧化和腐蚀；
(7) 具有可焊性(solderable)和抗焊蚀性(solder leach resistance)；
(8) 工艺简单；
(9) 制作成本低廉。

为了与导电银胶贴片工艺兼容，LED芯片焊接均采用400目以上的焊膏。使用中首先需将焊膏彻底解冻，取部分放置在固晶机的胶盒中，由点胶头机器手沾取胶后将其点在支架的内电极处，然后由芯片拾取放置机器手从蓝膜处摘取芯片并压放在内电极焊膏处，最后将贴片后的支架进行回流焊完成芯片的焊接。

芯片的焊接工艺具有焊接温度低、可返修、自适应对准的特点。其低温的特点使之可以用于含有有机高分子介质层的普通PCB板、铝基PCB板等不耐高温材质与芯片的焊接；由于可以返修，在焊接完成后通过后期的检测，如分光分色，可以将不合格的芯片高温熔化后剔除更换，这对于提升高附加值LED组件的合格率具有重要的意义；所谓自适应对准是指焊接中的浸润过程(wetting)产生的自对准(self-alignment)效应，实现过程如图4-21所示。由于芯片电极焊垫、支架电极焊垫的浸润性良好，支架的其他部分无浸润性，贴片过程中即使芯片电极焊垫(图中上部)与支架电极焊垫(图中下部)的位置并未精确对准，在焊料熔化过程中，借助于熔化焊料的表面张力自动对齐两个电极焊垫的位置。在MCM型LED照明组件、倒装LED器件及组件的贴片过程中，适当放宽固晶机的贴片位置精度而获得更高的贴片速度，利用在回流焊或烘箱烘烤焊料熔化过程中的自适应对准特性提高固晶精度。

浸润是一种材质表面的现象，反映了焊料与母材金属间的附着能力，附着力越大表示浸润性越好。图4-21展示了焊接过程中焊料与母材之间的浸润状态，图中的S表示母材，L表示熔融状态的焊料，V表示焊接环境气氛，如空气、氮气等。角度θ为浸润角，是熔融焊料表面与母材表面之间的夹角。图4-22(a)表示完全不浸润，诸如荷叶上的水滴，表示焊料与母体完全不可焊接。图4-22(b)表示完全浸润，诸如拨在水泥地上的水，表示

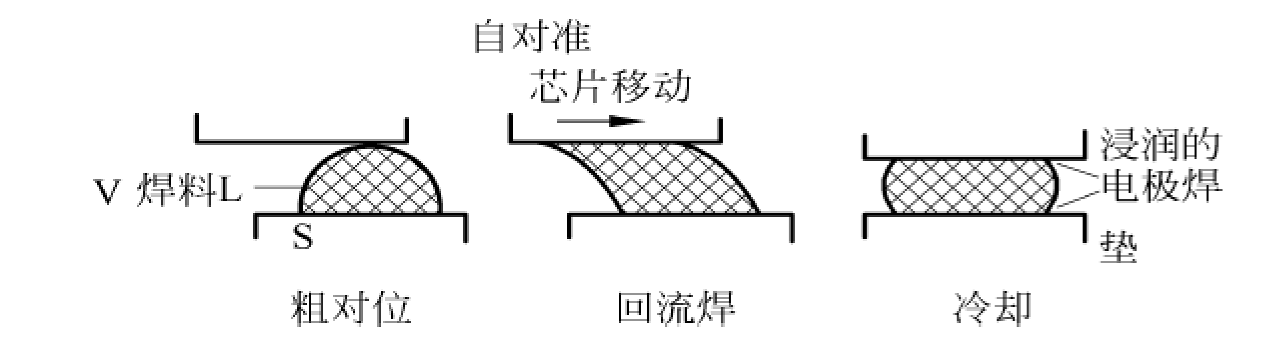


图 4-21　芯片焊接自适应对准示意图

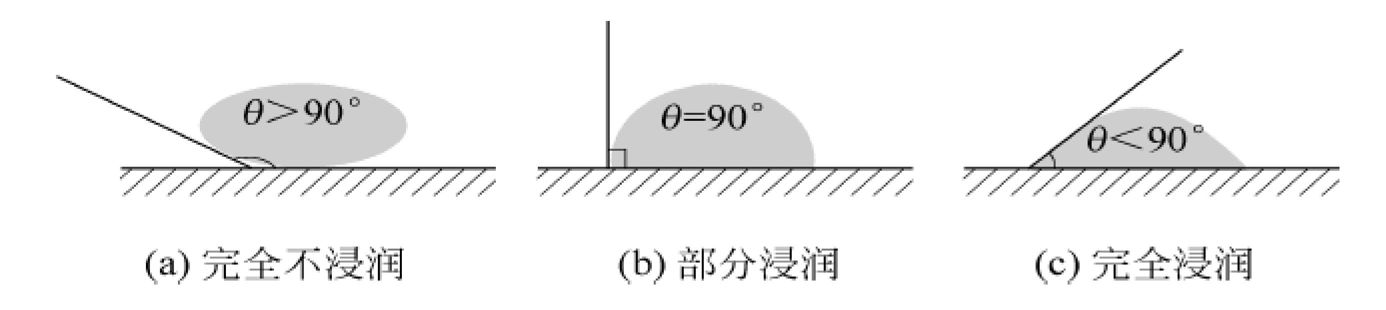


图 4-22　焊料的三种浸润状态示意图

焊料与母体完美焊接。图 4-22(b)表示部分浸润。一般规定当 $\theta<90°$时可焊性较好。浸润性与附着力之间满足公式：

$$P_{SF} = P_{LS} + P_{LF}\cos\theta \tag{4-1}$$

式中，P_{SF}、P_{LS}、P_{LF}分别表示母材与助焊剂之间的表面张力、熔融焊料与母材之间的张力、熔融焊料与助焊剂间的表面张力。

造成支架、基板或芯片电极焊垫浸润性差的主要原因是其表面被污染、氧化，如人手直接触摸电极焊垫将在其上沾污油渍等污染物，铜、银等金属较长时间放置在空气中会在其表面生长一层氧化层等。无论是污染物还是氧化物都将改变表面的浸润性，使得芯片焊接过程变得困难，产生空洞甚至焊接失败。解决的办法是在母材表面涂覆助焊剂，或是使用含有助焊剂的焊膏。助焊剂的功能是去除待焊母材表面的污染物质和氧化层，提供一个可被浸润的洁净金属表面，并防止加热焊接过程中的再度氧化。助焊剂包括有机、无机和芳香类三种类型，选择应依据：

(1) 足够的化学活性；

(2) 对支架电极和芯片电极焊垫金属具有优良的浸润性与流动性；

(3) 良好的热稳定性；

(4) 一定的电化学性；

(5) 对人体、环境无害；

(6) 焊接后的残留物容易清除。

焊接后应该去除助焊剂的残留物，否则可能造成连接的可靠性问题，如加电工作后残留物中离子的移动会造成 LED 电气性能的改变，甚至短路。所以，焊接完成后需要进行清洗工艺过程以去除上述残留物。早期使用氯氟碳化物(chloro fluoro carbons，CFC)清洗剂，但是，由于 CFC 对大气臭氧层的破坏，于 1996 年开始停止生产。目前，多用松香基清洗剂和水洗清洗剂。对于 LED 器件而言，虽然经过清洗可以去除离子的电移动影响，但是，清洗的过程与清洗的其他残留物可能会对 LED 的光输出特性造成一定的影响。所以，对于 LED 芯片焊接的助焊剂最好满足“免清洗”(no-clean)要求。现在市售的许多 LED 封装用焊膏满足“免清洗”要求，但是最好的方法还是在芯片焊接前对 LED 芯

片、支架与基板进行等离子清洗，增加其浸润性，降低对助焊剂的依赖。

正式选择焊膏前，应对其进行可焊性评估，典型的实验评估方法见图4-23。以图中的扩展实验法为例，实验过程见图4-24。在一块50×50×0.3mm洁净铜板（表面镀银或金层，与支架表面镀层一致）中心放置定量的焊膏（或焊料和助焊剂），用略高于焊膏熔融温度加热一定时间，观察焊膏的扩展面积或扩展率，也可观察浸润角，当浸润角小于90°时说明此种焊膏适合于该类LED芯片的焊接。焊膏的浸润性能也可用浸润天平（wetting balance）测量，其原理为将待焊接的支架或基板（称为样片）插入熔融态的焊料中，使用天平测量样片进出熔融焊料时受力的变化，通过算法折算成表面张力和浸润角。

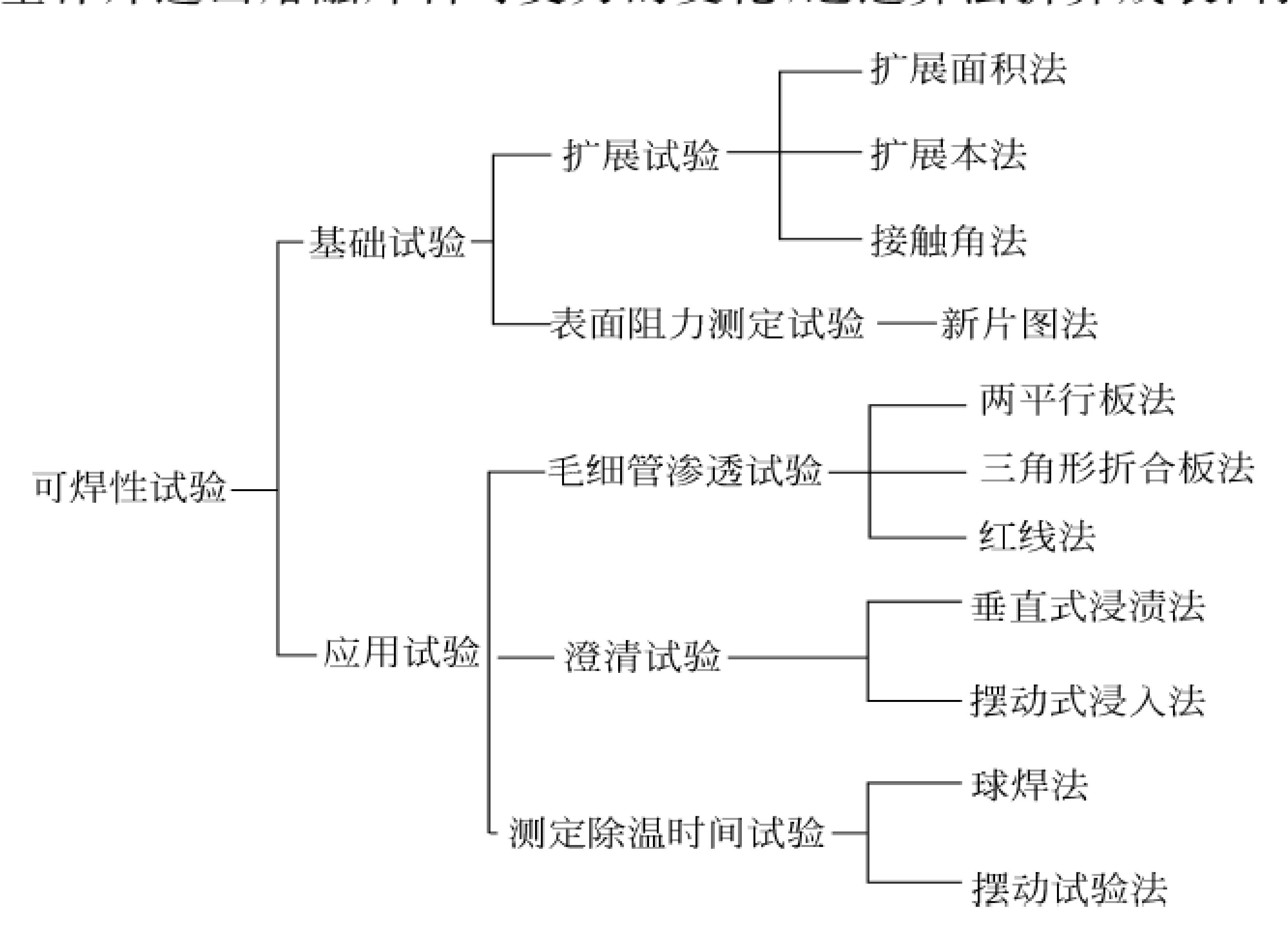


图 4-23　典型的实验评估方法

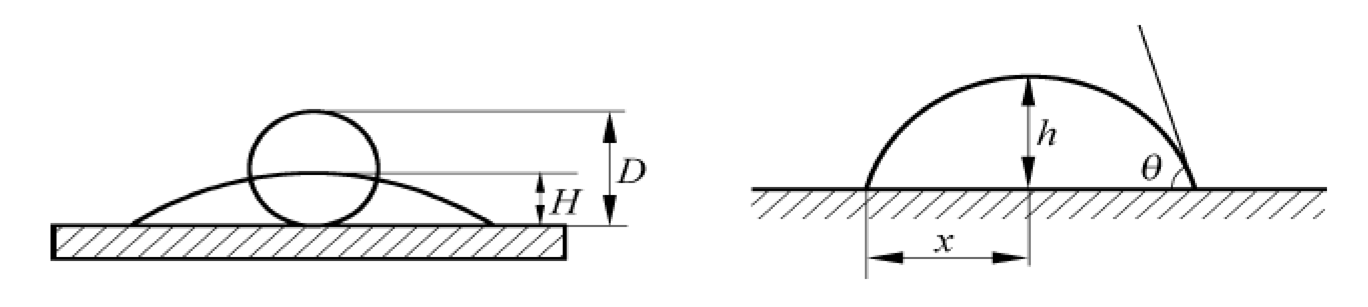


图 4-24　扩展实验法过程示意图

2. 共晶焊接方法

共晶焊接贴片是使用共晶焊料焊接LED芯片的一种工艺方法，焊接强度高、热阻小、可靠性高。要获得高的共晶焊接质量需要满足如下条件：

(1) 洁净、浸润的芯片与支架电极焊垫表面；

(2) 应在真空或是保护气氛中焊接；

(3) 焊接过程中始终保持稳定、大小合适的压力；

(4) 配比精确的共晶焊料，共晶温度准确、一致性好；

(5) 共晶焊料厚度适宜、形状和尺寸与芯片电极一致。

正常情况下，对于LED、LD（激光二极管）芯片的金锡共晶焊接，从加温至共晶焊接完成大约需要3秒。芯片焊接最常用的共晶焊料为金锡合金，共晶温度为278℃，有金锡

焊膏、金锡合金焊片产品出售。金锡焊膏的优点为共晶温度精确、对保护气氛要求低，但是，供应厂商少、价格高昂、厚度控制困难。金锡合金焊片的优点是共晶温度精确、可以按照芯片形状尺寸定制焊片，缺点为焊片厚度通常不小于 20μm、表面洁净性稍差、焊接过程不易实现自动化、不能进行倒装芯片的焊接。更为常用的共晶焊料则为芯片制作商将金锡合金焊料层溅射或电镀至半导体圆片中各个芯片电极的表面，也可以由支架基板制作商将其溅射或电镀在支架电极垫表面，该方式的最大优点是焊料层厚度控制好，一般为 3 ±0.5μm，热阻最小、可控、一致性好。此外，焊接过程简单、易于自动化、成本最低，已经广泛用于 LD 的共晶焊接。它的缺点为精确控制合金成分比例较为困难，焊接层的实际共晶温度往往高于理想的共晶温度，厂家提供的实际焊接温度多为 310℃左右。

目前，比较成熟的共晶焊接方法与设备如下：

1）真空共晶法

该工艺方法是使用普通的自动固晶机贴片、使用真空共晶炉进行芯片的共晶焊接，工艺流程为：将焊膏涂敷在基板电极焊垫处；固晶机将待焊芯片压放在焊膏处；将待焊器件放入真空共晶炉中，抽真空至 $1\sim10^{-3}$Pa；按照预先设定的温度曲线（一般应包括预热、升温、回流、冷却四个温度过程）加温；可以通过摄像机观察芯片焊接过程至焊接结束。在预热区维持较高的真空度是必要的，此时，在焊接前可以去除附着于芯片、支架、焊料表面的空气及其他有害物质，而这些物质往往在焊接过程中形成空洞，增加了共晶焊接层的热阻。该方法的优点是一次实现多个器件的共晶焊接、焊接效率高；缺点是无压力施予芯片，空洞率不易控制。该缺点可以通过使用专用的石墨夹具对 LED 芯片施压，并在真空共晶焊接中一直维持该压力的办法来解决。

2）振动超声法

该工艺方法是使用镊子共晶贴片机进行芯片的拾放与共晶焊接，图 4-25 为一种镊子共晶贴片设备的照片，工艺流程为：开启氮气流量计给共晶焊接炉添加保护气氛；给共晶焊接炉加温至焊接温度（共晶温度＋10～20℃）；手控镊子机械手将基板放入共晶焊炉；将芯片放在基板电极垫上并持续施压；启动超声和振动模式；人工观察共晶过程；待焊接完成后将焊接完成的器件放入产品料盒。该方法的优点为在共晶焊接过程中施予芯片压力和启动超声和振动模式，超声与振动的能量使得芯片与基板电极间产生横向摩擦，可打破表层的氧化物、挤压出各层间的气泡，减少焊接层空洞，提高共晶焊接的质量。该方法的主要缺点是效率低下、镊子容易损伤芯片。



图 4-25　WESTBOND 公司生产的手动共晶贴片机

3）自动贴片法

该方法适合于 LED 芯片电极制有金锡共晶焊料层的共晶贴片。所用设备包括 LED 自动固晶机、真空共晶炉或高温真空烤箱。工艺流程为：固晶机胶盘放入助焊剂；固晶机点胶头将助焊剂点在支架或基板电极垫处；固晶机芯片拾放机器手将 LED 芯片从蓝膜处拾起放置在支架或基板电极垫的助焊剂上；将待焊支架或基板放入真空共晶炉或中高温真空烤箱，抽真空至 $1\sim10^{-3}$Pa；按照预先设定的温度曲线（一般应包括预热、升温、回流、冷却四个温度过程）加温；也可在增加了氮保护气体的回流焊设备中完成共晶焊接。

4）自动压焊

基于上述类似的工艺思想开发出的芯片自动共晶焊接设备早已经投入使用，只是使用金属真空吸头替代镊子，不再施加振动与超声，并且在支架或基板电极待焊接区域附近制造局部的热保护气体。与现有的 LED 固晶机类似，具有自动上下料、自动对准、自动贴片、自动下料的能力。与普通 LED 自动固晶机的区别是在共晶焊接的整个过程中金属真空吸头始终施压于待焊芯片上表面，直至焊接完成。这类自动共晶焊固晶机的产能很低，每个芯片的焊接时间大约 4s，折合每小时的产能约为 800 只，远远低于普通 LED 固晶机每小时 20K 的产能。目前，这类自动化共晶焊接设备仅用于高附加值的如光通信用 LD 的贴片，在 LED 共晶贴片中尚未广泛使用。图 4-26 为国产 GJJ-450 全自动 LD 共晶贴片机照片。

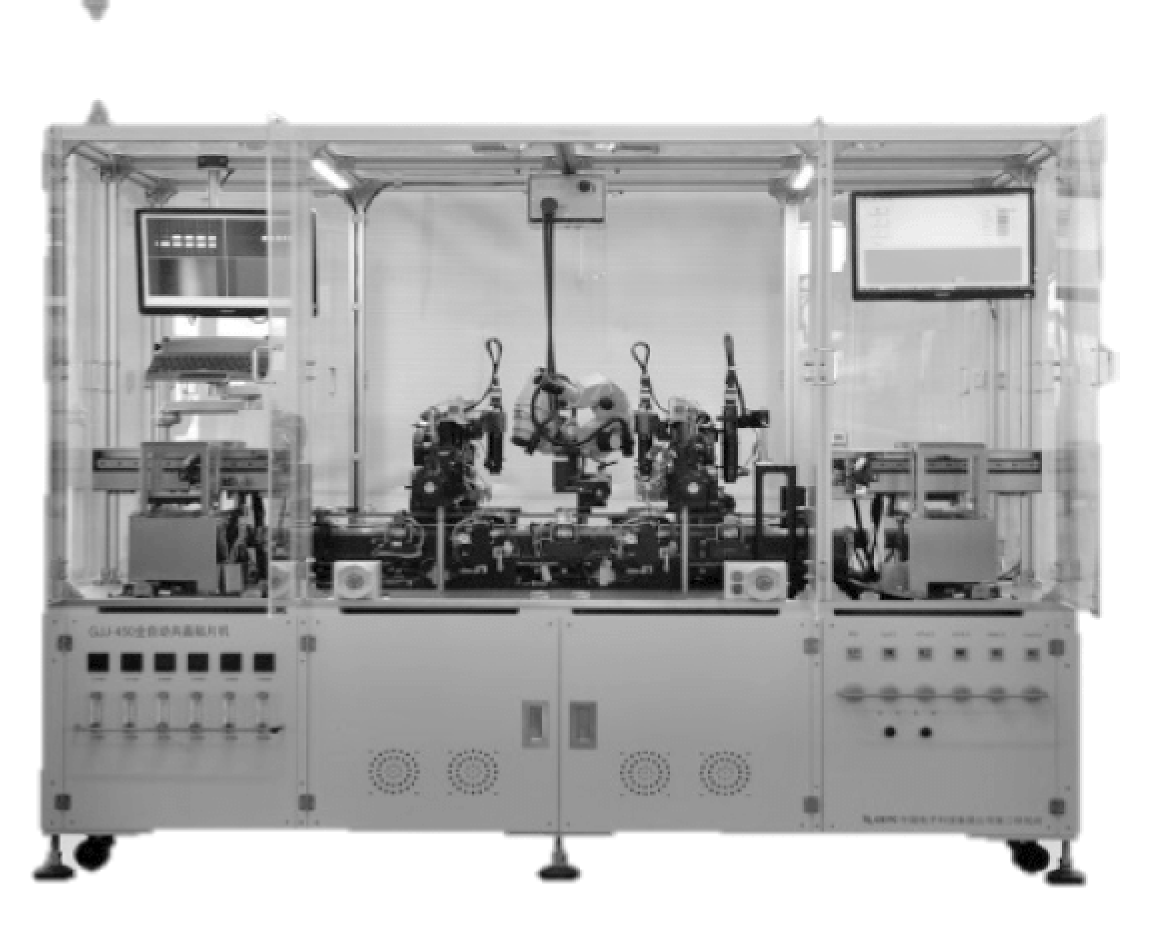


图 4-26　国产 GJJ-450 全自动 LD 共晶贴片机

3. 热超声焊接法

芯片的热超声焊原理与引线热超声键合的原理基本相同，将芯片与母材电极垫凸点对准压实，加热并施以超声能量。超声振动在芯片与母材电极垫金—金凸点接触面产生的摩擦运动使得凸点金属软化、有效接触面积增加，形成以范德瓦尔斯力为主的附着连

接。芯片的热超声焊接是一种无焊料的芯片连接技术，具有如下优点：

(1) 热超声焊形成的冶金结比传导离子和黏合剂形成的连接更为可靠；

(2) 焊接过程持续时间短；

(3) 特别适合于小间距的倒装芯片及阵列的焊接；

(4) 焊接成本低；

(5) 焊接层热阻最低。

采用该工艺技术将1W倒装LED芯片焊接在制有凸点电极垫的硅热沉基板上，凸点金属为金，直径为50μm，高度2μm。焊接条件为：焊接台温度160℃，超声功率2W，芯片压力5N，焊接时间1s，获得了每个凸点超过50g的剪切力，实施热超声焊的贴片设备为德国FINEPLACER LUMDA A6/A7倒装焊贴片机。但是，该技术还不能用于大面积电极垫芯片的焊接，因为此时必须施以芯片更高超声能量和更长的焊接时间，将会损伤LED芯片。此外，凸点面积仅占芯片电极面积的10%左右，其他部分为空气芯，拉高了总的等效焊层热阻。

4. 各向异性导电胶膜粘接法

各向异性导电胶(anisotropic conductive adhesive，ACA)是一种在X、Y轴方向上导电填料的体积分数很小，无法形成连续导电通道；沿Z轴向ACA施加压力，由于导电粒子和胶水的流动性差异，该压力提高了Z方向导电填料的体积分数从而实现了Z轴方向上的导电通道。ACA的成分以基体树脂和导电填料为主，还包含一定质量的固化剂、稀释剂、增韧剂和分散剂等。基体树脂的作用是粘接导电粒子至芯片与支架电极间形成导电通路，常用ACA成分与功能见表4-6。

表4-6 常用ACA成分与功能

说明	聚合物基体和其他助剂				导电填料
	预聚体	固化剂	增塑剂	稀释剂	
常用材料	环氧树脂、聚氨酯、酚醛类树脂等	胺类、咪唑化合物、有机酸、酸酐等	邻苯二甲酸类、磷酸三苯脂等	丙酮、乙二醇、乙醚、丁醇等	银、金、铜、碳粉以及复合粉体
基本功能	导电胶粘接功能的主要来源	形成不溶不熔的热固性树脂	提高材料的抗冲击性能	降低黏度(提高使用寿命)	提供导电能力

依据固化剂的种类ACA分为热固化和紫外(ultraviolet，UV)固化两类。前者需要给予胶体施压并维持一段时间的高温方可异化、固化；后者在给胶体施压后辐射一定时间的UV光后即可异化、固化。

依据使用状态ACA分为两种基本类型，一种是膜状各向异性导电胶(anisotropic conductive films，ACF)，另一种是膏状各向异性导电胶(anisotropic conductive pastes，ACP)。以下均以热固化类为例讨论。ACF在工艺实施前已经具有各向异性导电性，即将聚合物基体及相应的其他助剂混合成带状薄膜型，成膜时预加温加压处理，预处理的条件为：60～100℃，3～10×10^4 Pa，2～10s。此时，ACF已经具备了各向异性的导电通道，正式使用时再进行最后的加温加压处理即可。而ACP在使用前就是聚合物基体及

相应的其他助剂的膏状混合物，需要通过加温加压的工艺过程才能实现各向异性导电性。

热固化型 ACF 贴片的工艺过程如图 4-27 所示：剪裁 ACF，将 ACF 膜片贴附在基板电极垫处，芯片电极垫与基板电极垫对准，下压芯片，基板加温，去压降温，半成品放入烘箱高温烘烤，降温取出。

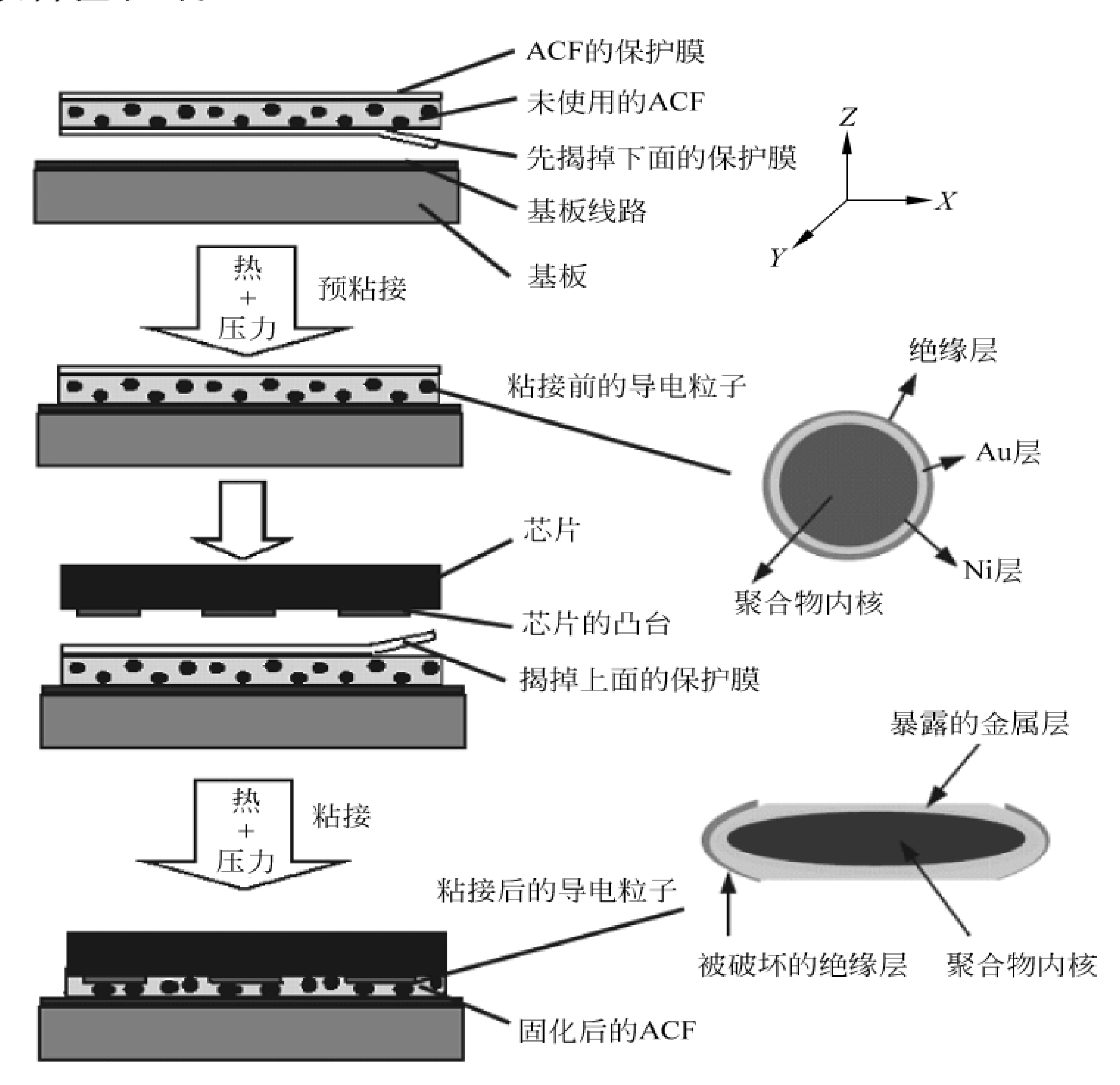


图 4-27　ACF 粘接示意图

需要注意的是，ACF 贴片过程中的加压加温条件远高于预成膜的条件，一般为 150～200℃，$20\sim40\times10^4$ Pa，10～20s。在此条件下，施压方向 ACF 中的导电粒子绝缘膜破裂，并挤压成为圆饼状连接为一体，导电通道接触面积增加，加热使黏合剂固化，持续保持导通状态。一般情况下，导通电阻小于 10Ω，垂直于施压方向则高于 100MΩ。

在 ACP 贴片中则需要丝网印刷导电胶至基板电极，其他部分与 ACF 工艺相同。使用紫外固化型的 ACA 固化更加方便，但是，芯片或基板应对 UV 光透明。

与普通的各向同性导电胶（如导电银胶）、钎焊贴片相比，ACA 具有如下优势：

（1）分辨率高，可以满足 50μm 量级的电极间隔的贴片，适应封装小型化发展的需求；

（2）自身密度小，符合封装轻量化的发展趋势；

（3）有效地降低了粘接层疲劳和应力开裂的问题发生率；

（4）柔性及耐疲劳性优良；

(5) 适于 ACA 粘接的基材数量多,对表面要求低;

(6) 工艺简单、加工成本低;

(7) 对人体无害。

目前,ACA 基材的耐热性、热稳定性及固化后的连接电阻率等均有很大的提升空间,性能进一步完善后,不仅在电子卡片的 IC 封装中依然起到中流砥柱的作用,在小功率、高密度 LED 阵列等产品的封装中也会逐步占有一席之地。

4.2.9 芯片焊接质量的评估

芯片封装的可靠性主要受其物理保护和热膨胀适配两个因素的影响,焊接层热阻是反映封装热性能的主要参数,导致热阻增大的主要原因是焊接层的空洞。焊接层热阻的增加将导致一系列问题的发生,如热阻增大导致结温升高、光电性能变差,特别是焊层内金属的迁移速度变大,进一步扩大空洞,同时也加大了短路芯片有源区的概率,导致器件的失效。此外,空洞也会加大焊接层对芯片施加的热应力,增加失效的机率。一般使用空洞率表示焊层空洞的多少,它可以用焊层中空洞的面积除以焊层面积并以百分数表示。以下仅就使用最多的导电银胶、焊膏钎焊与共晶焊三个工艺固晶过程中产生空洞的机理及解决方法进行讨论。

1. 导电银胶固晶方式产生空洞的主要原因及改善方法

胶体冷藏过程及开启使用各个的阶段,其内部混杂了少量的露水,完成芯片贴片后的烘烤过程中没能有效的将水气赶净,高温气化后在焊层中形成空洞。LED 芯片的焊膏钎焊、共晶焊接都是在短时间高温状态下快速完成芯片与基板的连接,焊接过程中容易形成空洞。

通过如下方法可以减小焊层的空洞率:

(1) 冷藏保持环节:应在干燥空气条件下包装密封导电银胶,最好是真空处理条件下,之后将密封包装整体放入冰箱保存;

(2) 贴片环节:一般应在贴片前 2 个小时从冰箱取出导电银胶并在干燥条件下自然充分解冻,贴片环节也应保证合适的湿度;

(3) 固化环节:按照导电银胶供应商的条件(温度、时间)固化,在前段采用真空、较低温度的预固化会适当减少空洞率。

2. 焊膏固晶焊方式产生空洞的主要原因

焊膏中的液态助焊剂在高温焊接过程中没有完全气化挥发形成气泡,或者芯片、支架电极垫金属表面处理不善,如表面形成了局部的氧化层、局部被油渍污染等,焊料不能在此形成良好的浸润,这些都可能在焊层局部形成空洞。

通过如下方法可以减小焊层的空洞率:

(1) 焊膏的冷藏与使用采取与导电银胶类似的处理方式可以减少空洞率;

(2) 在真空环境下完成芯片的焊接过程可以减少空洞率;

(3) 采取合理的预热→活化→焊接(回流)→冷却曲线完成芯片的焊接可以减少空洞

率，该曲线可以在焊膏厂家推荐的基础上实验改进获得；

(4) 焊接中采用适度的机械振动、超声振动可以破坏芯片或支架电极垫表面的氧化层，减少空洞率；

(5) 焊接前对芯片或支架电极垫表面进行等离子体轰击洁净化处理可以减少空洞率；

(6) 焊接过程中始终给予芯片适度的压力可以减少空洞率；

3. 电极垫制有金锡共晶层的芯片或支架固晶方式产生空洞的主要原因

如若采用手动或自动共晶固晶机贴片，并在贴片过程中始终施加压力、不使用助焊剂，此时产生空洞的主要原因是电极垫金属表面处理不善或保管不善形成了不利于浸润的局部区域，如前所述。如若使用了助焊剂，则助焊剂在高温焊接过程中没有完全气化挥发留下气泡形成空洞。

通过如下方法可以减小焊层的空洞率：

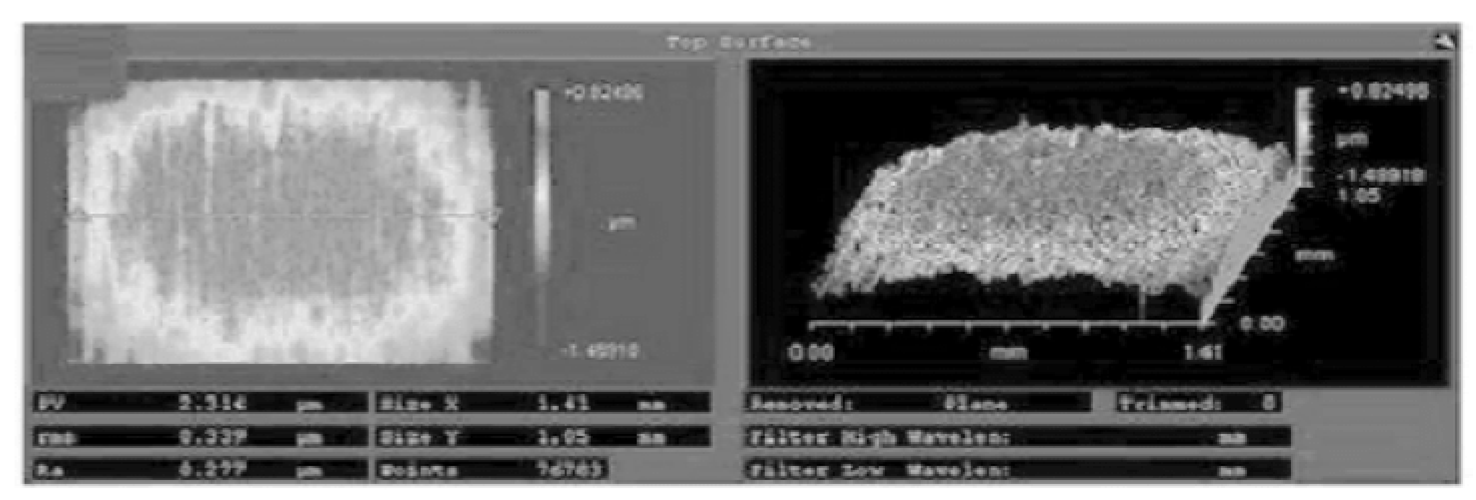
(1) 若使用助焊剂焊膏贴片，应选择易于气化、残留少的助焊剂，采取合理的预热→活化→焊接(回流)→冷却曲线完成芯片的焊接，最好在真空条件下完成焊接过程，给芯片始终施加适当的压力更佳；

(2) 若没有使用助焊剂焊膏贴片，应在保护气体(如氮气)中进行芯片的焊接，始终给予芯片适当的压力，若同时施加适度的机械振动或超声振动则效果更佳；

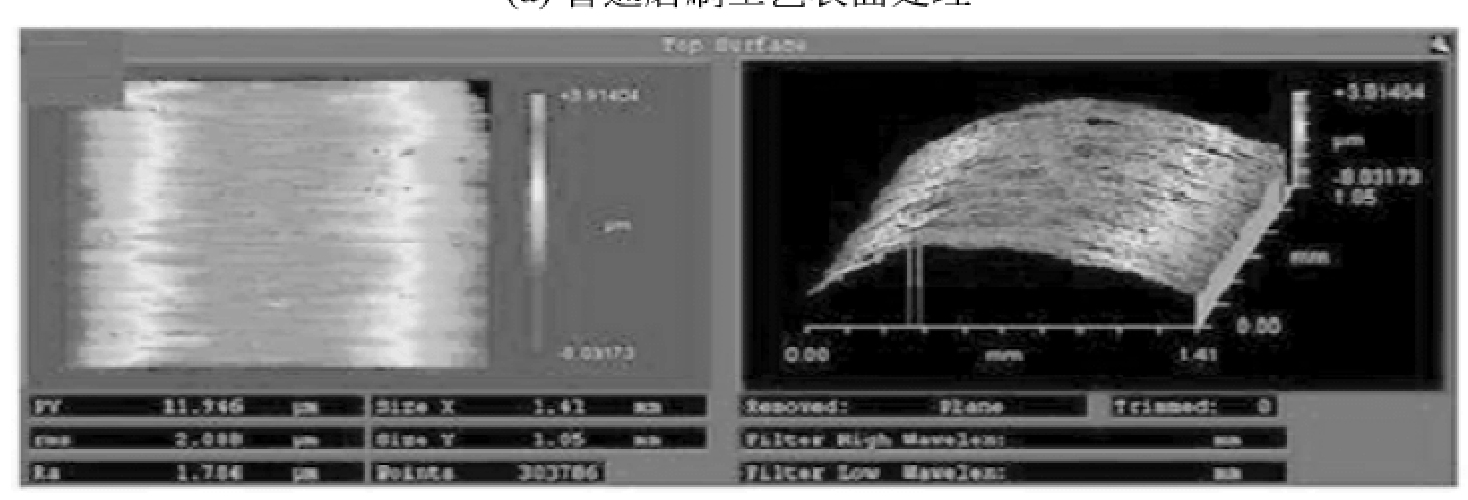
(3) 由于电极垫处金锡焊接层厚度一般为 3μm，支架或基板材料的粗糙度(surface roughness，Ra)将直接影响电极垫处金属的表面粗糙度，仅经过普通磨刷工艺的氧化铝陶瓷基板的粗糙度达到 1.41μm，磨抛处理后的粗糙度可降至 0.27μm 以下，如图 4-28 所示。它们与陶瓷或金属基板的翘曲度(warp degree)共同影响焊接层空洞率。翘曲度可以参考 IPC-A-600G 中 2.11 平整度标准，即用于 SMT 贴装的 PCB 板的扭曲和弓曲度应均小于 0.75%。减小粗糙度和翘曲度可以减少空洞率；

(4) 陶瓷基板上的电路层工艺制成方法也将影响空洞率的大小，如采用厚膜工艺制备则基板电极垫处粗糙度很高(即使陶瓷基板经过了严格的磨抛处理)，可达数个 μm 量级，其原因包括基板与金属浆料两个方面。银钯浆料中的金属颗粒尺寸在 1～5μm 范围，烧结过程中银钯浆料中的玻璃料首先软化横向流动逐步填平陶瓷基板表面凹凸部位形成“锚接”结构，金属相则渐进式升浮于玻璃相形成一种表面金属含量最高、陶瓷基板表面处金属含量最低的渐变电路层结构，这种烧结过程表面随机性也将劣化厚膜电路层的粗糙度。此外，厚膜电极垫表面局部少量的玻璃相材料与金属焊料的非浸润性也很会强化空洞的形成。由厚膜电路层与陶瓷基板结合的机理可知，陶瓷基板的粗糙度不可以太低，过低的粗糙度不利于电路层的附着性。薄膜电路层与基板的附着机理是打底金属，如镍、铬、钛等易于与陶瓷基材形成中间化合物，通过中间化合物形成了电路层与陶瓷材料的牢固附着性。因此，用于芯片共晶焊接的陶瓷基板电路层使用薄膜工艺制备更为理想，可以减少空洞生成的概率。

上述几种焊接方法中，导电银胶固晶工艺产生空洞的机率较小，而焊膏固晶更容易产生空洞，无论是普通焊膏还是共晶焊膏。使用 X 射线仪(X-ray)、超声显微镜(ultrasonic microscope)可以对空洞率进行无损测量，图 4-29 是使用 X 射线仪测量的导电银胶固晶、



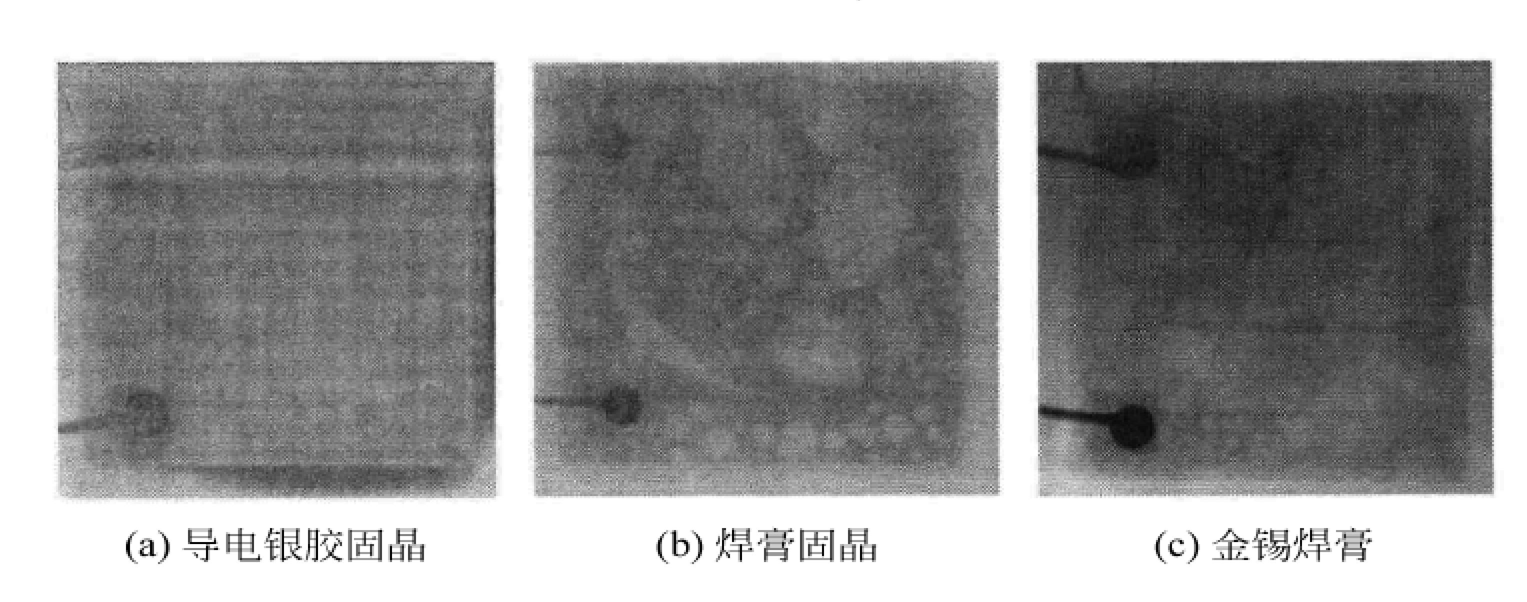
(a) 普通磨刷工艺表面处理



(b) 磨抛表面处理

图 4-28　一种氧化铝基板的表面粗糙度

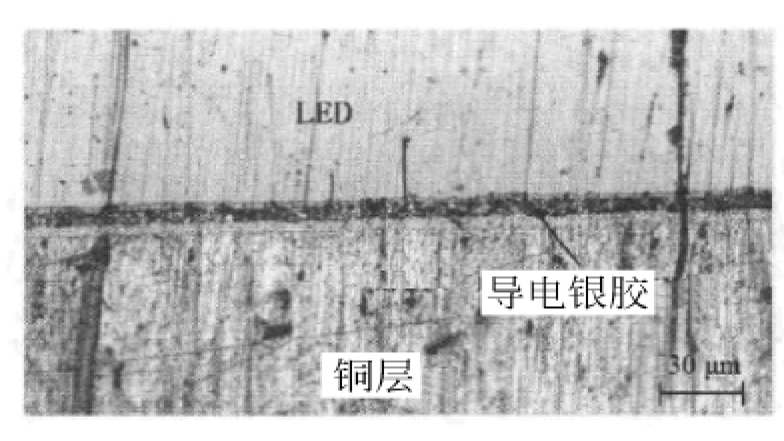
焊膏固晶、金锡焊膏焊接层空洞率的照片，由图可见导电银胶固晶的粘接层几乎没有空洞，而焊膏固晶的焊接层的空洞率很高。X 射线仪的图像处理功能使得其可以自动计算空洞率，国产 X 射线仪空洞率测试的误差大于 5%。如若测量焊接层剖面的空洞情况及界面材料的状态，必须先对待测器件进行切片、研磨，露出待测的剖面，使用高倍光学显微镜或扫描电镜(scanning electron microscope，SEM)进行相关测试。图 4-30(a)为导电银胶粘接层剖面的光学显微照片，图中底部暗区为基板及电极垫材料，上部浅色区为 LED 芯片，中间夹层为焊接层，由图可知该层几乎没有空洞的存在；图 4-30(b)为焊膏焊接层的剖面的 SEM 照片，由图可见该层有一 20μm 左右的空洞存在。



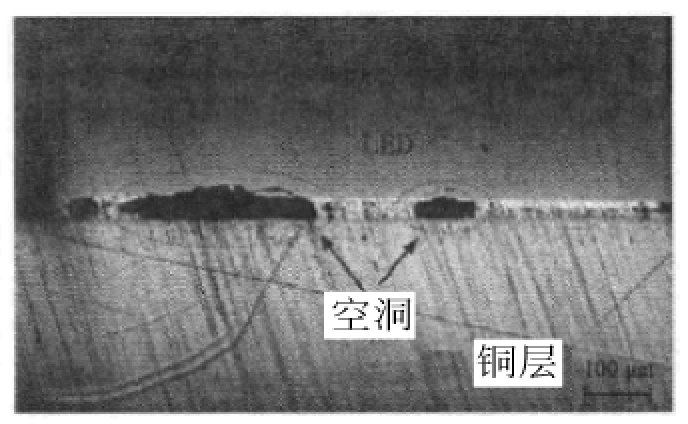
(a) 导电银胶固晶　　(b) 焊膏固晶　　(c) 金锡焊膏

图 4-29　X 射线仪测量的焊接层空洞率(照片中浅色部分为空洞)

研究表明在焊接过程中给芯片施加约 15g 左右的压力，LED 芯片结温下降了约 7%，这是由于该压力使得焊接层厚度减小、空洞率降低共同作用的结果。过大的压力对结温的降低不再有贡献，同时将会造成芯片的损伤。



(a) 导电银胶



(b) 焊膏

图 4-30 焊接层剖面的光学显微照片

4. 空洞与热阻

空洞将造成芯片焊接层热阻的升高，其原因为空洞内气泡的高热阻特性。此时，焊接层总的等效热阻是空洞面积的热阻与余下焊接层面积热阻的并联。对于常见的陶瓷封装 LED 组件，封装热阻中扩展热阻所占的比例较大，一般大于焊接层热阻。因此，空洞率的增加不仅直接加大了焊接层的热阻，也加大了扩展热阻。

4.2.10 芯片固晶的可靠性

常用的氧化铝陶瓷基板管壳，其电路层多用薄膜工艺制备，打底金属为溅射的镍、钛或铬，其上溅射薄铜，之后电镀厚铜至数个微米，在其上电镀亚微米至微米量级的金（称为镀金基板），为了降低成本也可在厚铜上电镀微米量级的银（称为镀银基板）。

实验研究发现不同的材料组合及不同的固晶方式对 LED 器件的光电性能及长期工作的可靠性产生较大的影响。实验发现：

（1）无论使用镀金基板还是镀银基板，常用共晶焊工艺的 LED 器件初始焊接层热阻最小，导电银胶固晶的粘接层热阻最大，焊膏焊接的焊接层热阻居中。原因为共晶焊接层的厚度最薄（约 3μm）、热导率较高（约 57W/(m·K)），导致了最低的热阻；焊膏(96.5Sn3Ag0.5Cu)的热导率虽然最大（约 67W/(m·K)），但其厚度较大（约 20μm），导致了电阻并不是最低；导电银胶不仅热导率最小（约 17W/(m·K)），而其厚度也较大（>20μm），导致了热阻最高；

（2）在镀银基板的情况下，经过超过 2000 小时的高温大电流老化，金锡共晶焊接层的热阻增加值最大，焊膏焊接层热阻增加值居中，导电银胶粘接层热阻增加值最小。金锡共晶焊接层的热阻增加值最大的可能原因为高温、强电场作用下银的迁移产生了基板电极与焊接层的缝隙，热应力致使富锡中间化合物脆裂等。经过超过 2000 小时的高温大电流老化实验后，金锡共晶焊接 LED 产生了近 25％的光衰，焊膏焊接 LED 产生了近 20％的光衰，而导电银胶粘接 LED 的光衰小于 10％；

（3）在镀金基板的情况下，经过超过 1000 小时的高温大电流老化或高温高湿存储实验，金锡共晶焊接层的热阻增加值最小，焊膏焊接层热阻增加值最大，导电银胶粘接层热阻增加值居中。空洞扩大是导致焊膏焊接层热阻增加的原因，包括银在高温下的迁移、高温热应力催化的富锡中间化合物脆裂缝隙等；金锡共晶焊接层的热阻增加值最小的原

因可能为富金中间化合物的高强度及高的稳定性；导电银胶粘接层热阻增加的原因为高温、强电场加速了银的迁移在粘接层中产生了小的间隙。经过超过1000小时的高温大电流老化或高温高湿存储实验后三种贴片方式封装的LED的光衰均在3%以内。

4.3 功率型LED封装

为满足照明设计的需要，LED芯片及封装向大功率方向发展，要求在大电流下提供比直插式LED大20倍以上的光通量。由于加大工作电流将使LED的结温迅速增加，而LED的性能、寿命随着结温的升高而急剧劣化，因此，有效的热管理设计成为功率型LED芯片及封装的首要考虑。由于蓝宝石（Al_2O_3）衬底的导热系数仅为25W/(m·K)，远低于碳化硅（SiC）和硅（Si），所以，蓝宝石衬底制作的功率型LED芯片多采用倒装结构，这样可以通过缩短热传导路程而大幅降低芯片热阻。与直插式封装相比，表面贴装（SMT）型封装的传热通道更短，故热阻更低。典型的功率型封装的LED器件均采用SMT结构，并开始运用电子封装中发展成熟的共晶贴片技术，以达到进一步降低封装热阻的目的。以下介绍几种典型的功率型封装技术。

4.3.1 Luxeon系列LED的封装结构

该系列LED由美国LumiLEDs公司于1998年研制成功，Luxeon系列LED的典型封装结构见图4-31，管壳采用PLCC工艺制成，属于热电分离型结构，即热传导主通道与电路通道未重合。热传导主通道为一冲压成平底杯状的铜合金柱块，为提高平底杯的反光率在铜合金柱块表层镀银。电路通道为两个金属框架电极。通过热塑PPA、尼龙、环氧树脂将热沉、电极连为一体。此类管壳仅适用于正装的蓝宝石衬底芯片或倒装在硅基板上的蓝宝石衬底倒装LED芯片。封装过程如下：LED芯片贴装在热沉反光杯平底中央；键合金丝连接芯片电极与金属翼翅电极；灌封掺黄色荧光粉的透明硅胶至反光杯平满；灌封适量透明硅胶；将模压的透镜盖装在管壳上部；真空排泡；热固化。

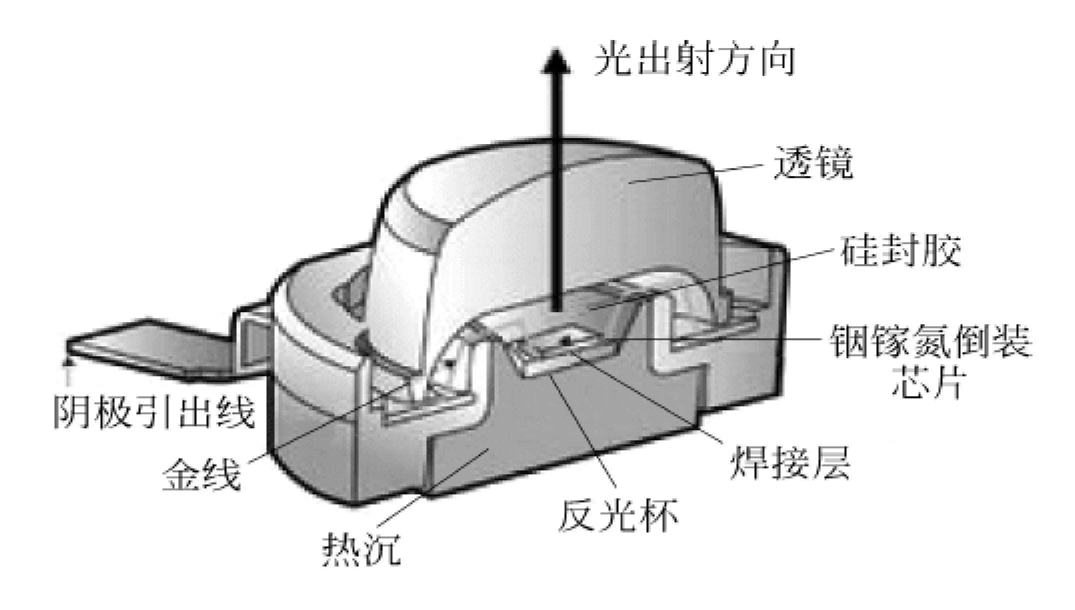


图4-31 Luxeon系列LED的封装结构

该类封装结构改善了功率型LED芯片在大电流工作状态下的热性能，具有如下特点：

(1) 热阻低、承载功耗大：Luxeon 系列 LED 的典型热阻为 14K/W，仅为传统直插式 LED 热阻的 1/20 左右，适用于输入电功率为 0.5～5W 封装的 LED 器件；

(2) 可靠性高：虽然该类结构的芯片材料与热沉材料、热塑材料间存在较大的热膨胀系数差异，但是，通过在反光杯中灌封柔性的胶体，即使在 40～120℃的骤变温差下也不会因为热应力造成键合金丝与金属框架引线的断路。也不存在普通环氧树脂长久高温环境下使用所产生的泛黄现象；

(3) 出光效率高：通过反光杯和透镜的优化设计可以提高出光效率，并可控制输出光斑形状。

使用中常与铝基电路板(铝基板)搭配，铝基板的铝板与热沉直接连接以降低热阻，其电路连线与金属框架电极焊接为一体实现电连接。

该类 LED 主要应用于各种户内、户外照明光源，包括落地灯、射灯、户外洗墙灯、路灯和特种灯具等领域。

4.3.2 Golden Dragon 系列 LED 的封装结构

该系列 LED 由 OSRAM 公司于 2003 年研制成功，典型的 Golden Dragon 系列 LED 的封装结构见图 4-32。由图可见，该系列的管壳结构与 Luxeon 系列类似，出光面不再使用透镜，直接灌注透明硅胶即可。广泛用于液晶电视背光源等领域。

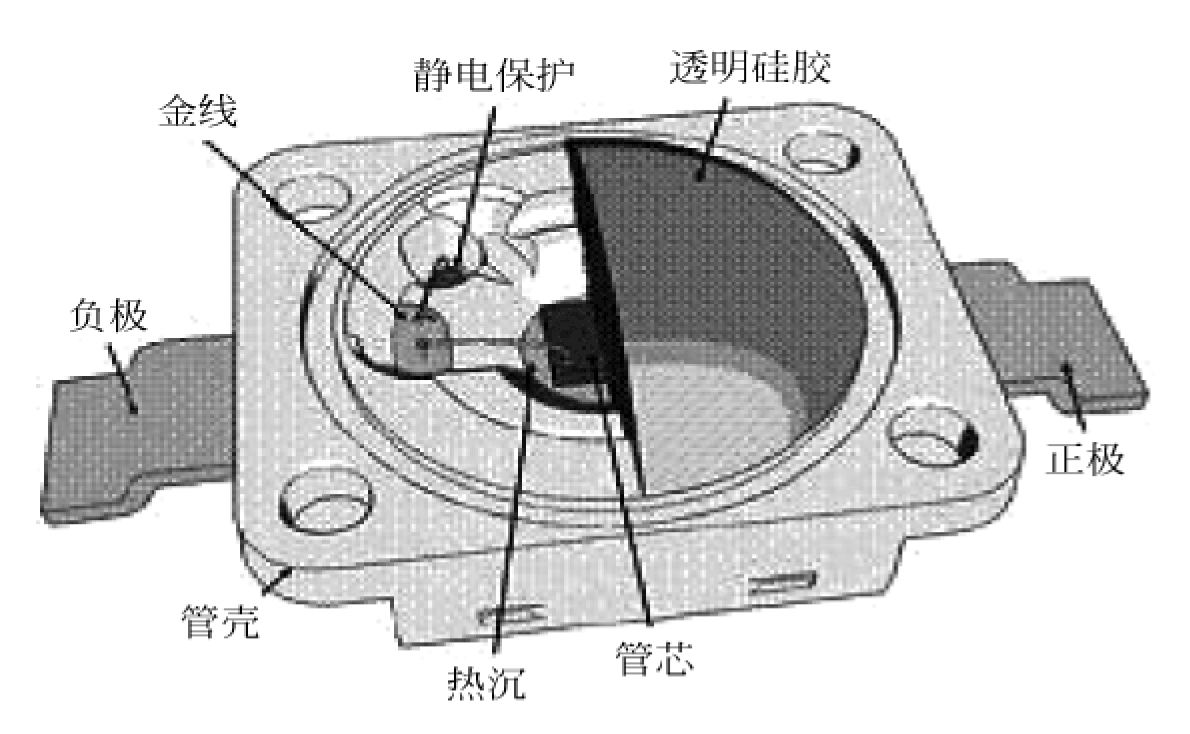
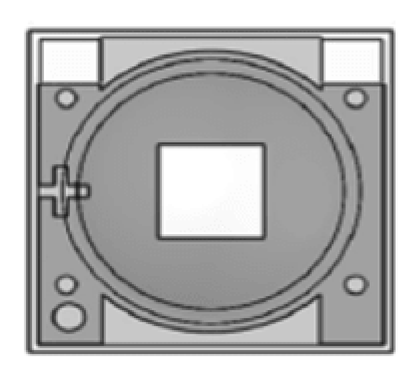


图 4-32 Golden Dragon 系列 LED 的封装结构

4.3.3 XLAMP 系列 LED 的封装结构

XLAMP 系列 LED 是 CREE 公司研制成功的一种功率型 LED 器件，如图 4-33 所示。

由图可见，该系列管壳采用氧化铝陶瓷材料作为基板，薄膜工艺制成金属电极，通过金属化微孔连接正面的 LED 芯片电极和背面的外电极。LED 芯片粘接在管壳正面中央，键合金丝连接正负电极，通过电泳等方式在 LED 芯片表面制出保型荧光粉膜层，将玻璃半球透镜粘接在芯片上部，也可使用模压工艺制作 PMMA、PC 或硅胶透镜。




(a) 管壳设计图

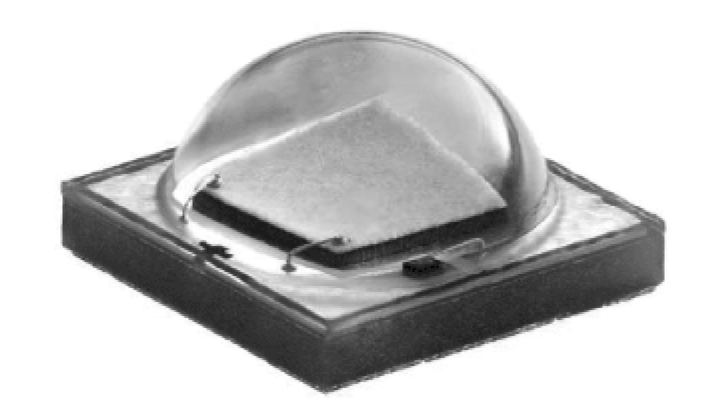

(b) 器件样品

图 4-33　XLAMP 系列 LED 器件

该系列获得了极佳的光色热电性能，具有如下特点：

（1）热阻更低：XLAMP 系列 LED 的典型热阻小于 9K/W，约为 Luxeon 系列的一半，适用于输入电功率为 1W 以上封装的 LED 器件；若功率更大，则可采用氮化铝陶瓷基板；

（2）可靠性更高：由于芯片材料与陶瓷材料间的热膨胀系数近乎匹配，可以适应更宽骤变温差的工艺过程及更宽的工作温度范围、更大的工作电流，避免了因热应力失配造成的键合金丝断裂；

（3）光性能更好：采用了无反光杯光学设计，可以获得更大的发光角，其典型值可以达到 115°以上；由于氧化铝陶瓷的反射率高达 92%，该结构的光效更高。

与之类似的还有 Lumileds 公司 rebel 系列 LED，以 AlN 陶瓷作为基板材料，通过硅胶模压的方式形成透镜，可以承受更高的输入电功率，如图 4-34 所示。



图 4-34　Lumileds 公司 rebel 系列 LED 照片

4.3.4　多芯片 LED 光源模组封装

一般照明应用需要光源输出的光通量达 1000lm 以上，目前，普通功率型 LED 器件的输出光通量远远达不到上述要求，如 1W LED 的典型输出光通量为 130lm 左右。有两种方式可以达到照明光源的需求：其一为设计更高功率的 LED 芯片，目前，实验室样品已经达到 10W 以上量级，芯片功率越高尺寸越大，芯片的取光效率、热设计越发困难，成品率也越低，对封装的热设计要求也越高；其二为在同一个载体上封装若干个低功率 LED 芯片，在较小的尺寸上获得较高的输出光通量。后者是一个在现有芯片基础上比较

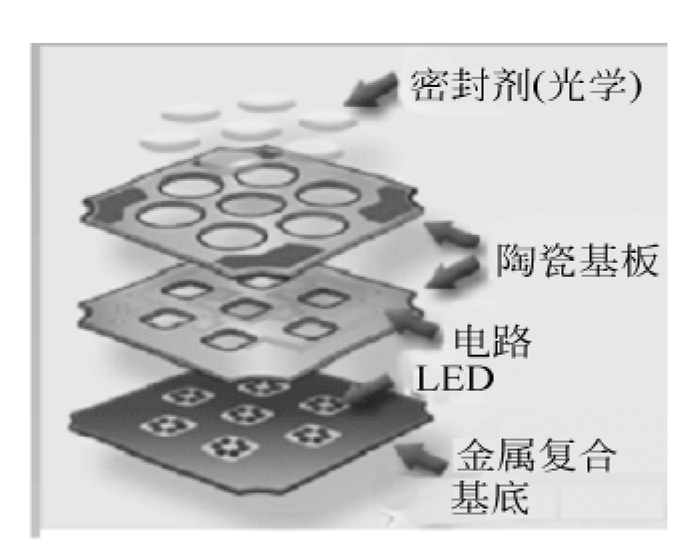
容易获得较高光通量输出的方式，称之为多芯片集成封装，也叫多芯片 COB(chip on board)封装，已经成为目前固态光源的一种重要封装形式。

1．陶瓷基板多腔封装

美国 Lamina 公司发明的多腔 LED 阵列系列采用金属基板低温共烧陶瓷工艺制作，如图 4-35 所示。金属基板采用钨铜合金，绝缘层采用氧化铝陶瓷，金属电路层采用银钯浆料。LED 芯片直接焊接在各个腔对应的钨铜合金基板的相应位置处，采用金丝热超声球焊工艺将金丝键合在 LED 芯片与银钯电极上，荧光粉灌注在各个腔中。该系列 LED 阵列的热阻低达2K/W 以下。




(a) 多腔LED阵列



(b) 管壳结构组装示意图

图 4-35 多腔 LED 阵列及其管壳结构组装示意图

2．金属基板多芯片封装

美国 UOE 公司生产的 Norlux 系列功率 LED 器件，采用六边形碳钢基板作为基体材料，在其上部烧结洋瓷作为绝缘材料，之上烧结银钯浆料作为电路层，最多可以将 48 个红、绿、蓝小功率 LED 芯片粘接在银钯电路层的相应位置，并在 LED 芯片区域灌封高透明的硅胶作为出光窗口。管芯的键合引线通过电路层上制作的两个接点与正、负极连接，为提高可靠性，键合引线处及外电极均在银钯层上印刷并烧结金钯浆料。可根据所需输出光功率的大小来确定电路层上排列管芯的数目，其发射光分别为单色、彩色或合成的白色，典型热阻为 10K/W。Norlux 系列功率 LED 器件见图 4-36。

目前，更为流行的类似 Norlux 系列封装的光源模块采用铝基 PCB 板作为载体，采用光刻腐蚀工艺制出电路层，将蓝光 LED 粘接在电路层适当位置，并采用热超声金丝球焊工艺连接芯片电极和外电极，使用围坝胶在芯片四周制出环形或其他形状的“围坝”，在其内部灌封混有荧光粉的透明硅胶，见图 4-37。该类器件的色温可调、尺寸较小、制程简单、成本低廉、输入功率 1～15W，容易实现炫光较小的均匀面光源。可以用于球泡灯、射灯等室内应用照明光源。但是，由于铝基 PCB 板的热阻较大、金属层与芯片的热膨胀系数失配严重，可靠性存在先天不足。

另外一种类似的金属基板多芯片封装 LED 模块采用镀银的铜或钨铜合金作为热沉载体，通过热塑 PPA 将热沉、镀银金属片状支架电极连为一体，并在热沉中央制出方型的 PPA“围坝”，将若干颗蓝光芯片直接粘贴在热沉载体的适当位置，通过热超声金丝球

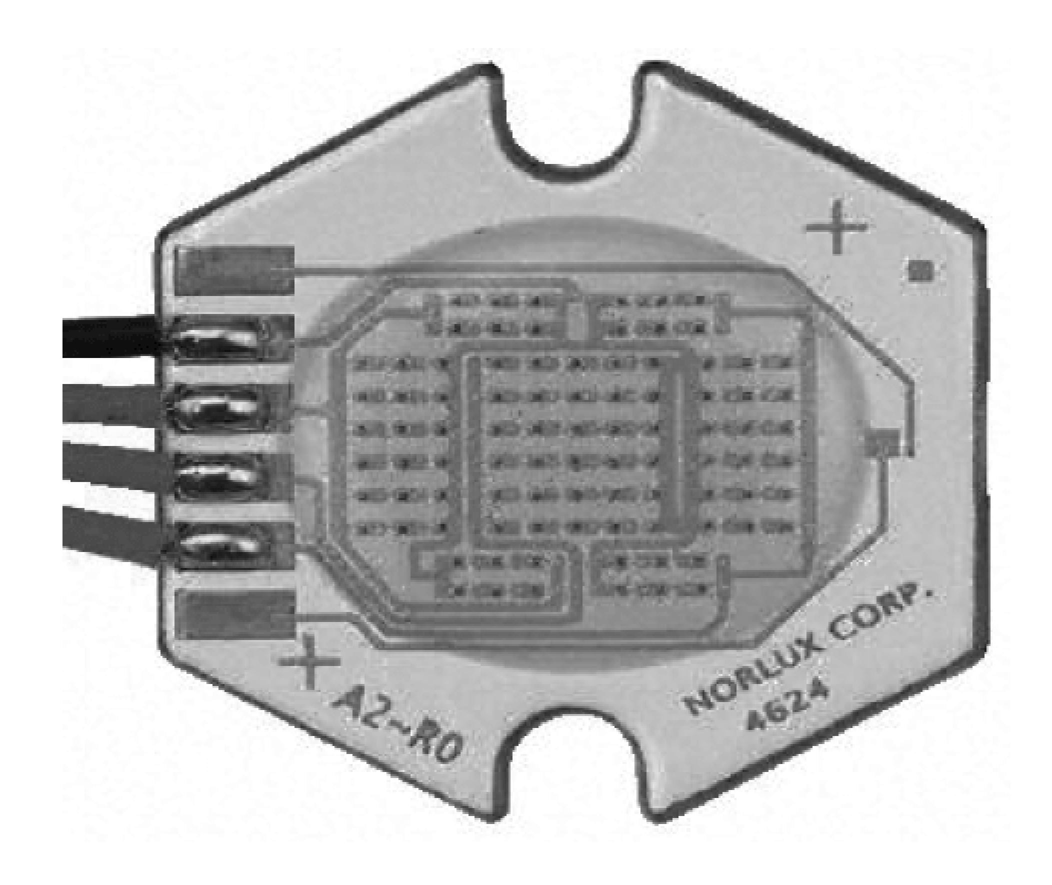
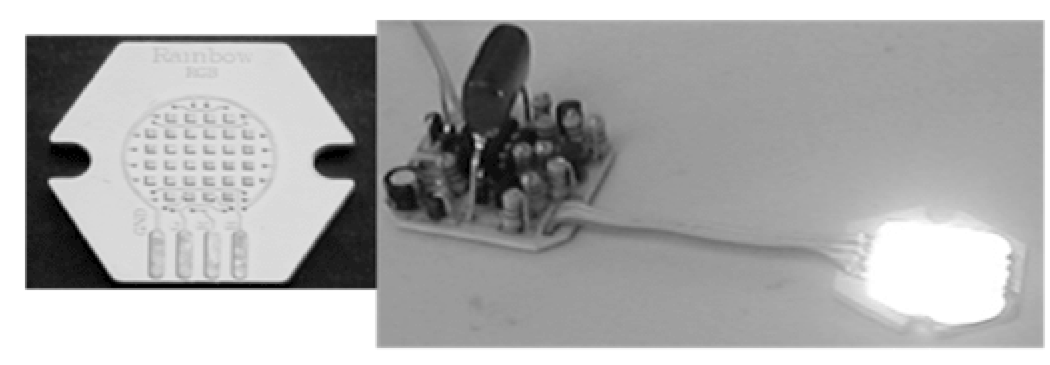


图 4-36　Norlux 系列 LED 器件



MCM RGB-LED管座　　　　发光器件

图 4-37　铝基 PCB 板集成封装 LED

焊工艺串并连接芯片之间的正负电极，并将首尾两颗 LED 芯片的正负电极分别与外电极的正负电极键合连接，在其内部灌封混有荧光粉的透明硅胶，见图 4-38。

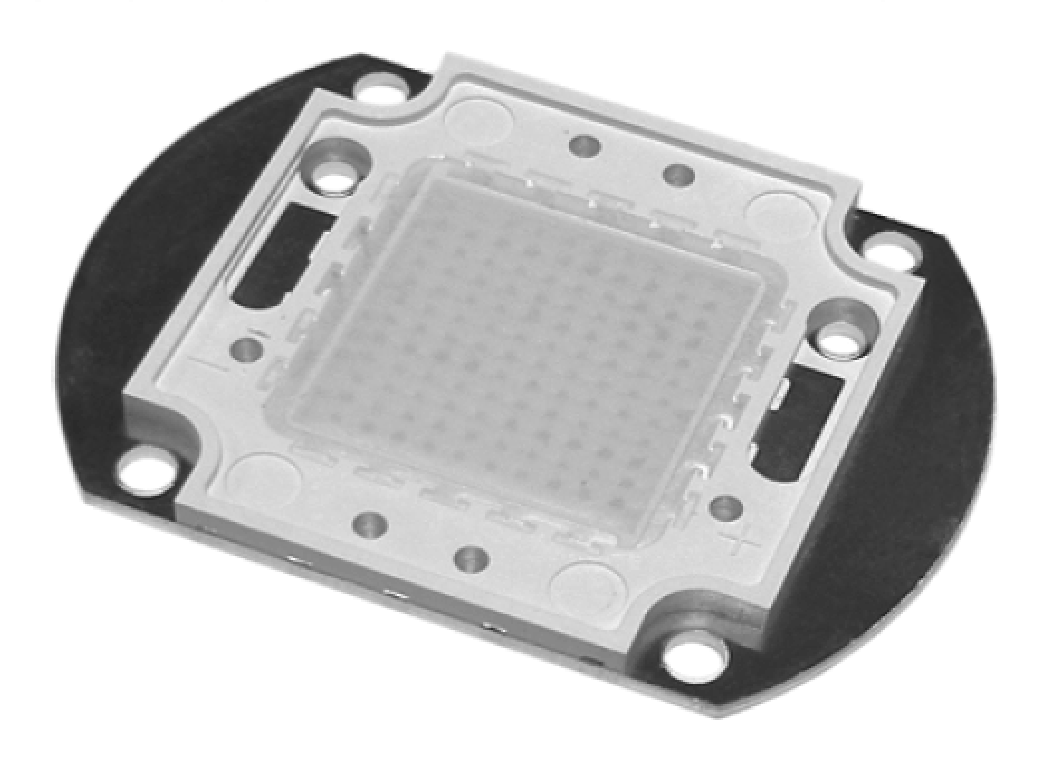


图 4-38　路灯用金属基板多芯片封装 LED 模块

该类器件的色温可调、尺寸较小、散热良好、成本低廉、输入功率可达 150W，主要用于路灯、工矿灯、洗墙灯等室外照明光源。与前述类似，该类光源模块的金属层与芯片的热膨胀系数失配严重，且芯片直接封装在导电基板之上将造成潜在的触电危害，在气候恶劣及对电隔离安全性要求高的地区应慎用。

3. 陶瓷基板多芯片封装

将金属基板换为氧化铝陶瓷基板是解决金属基板多芯片封装LED安全性及可靠性方面缺陷的可行方案。图4-39为陶瓷基板多芯片封装LED的样品照片。由图可见，采用厚膜工艺制出银钯电路层和电极，使用围坝胶在陶瓷基板中央制出环形硅胶“围坝”，将若干颗小功率蓝光LED芯片用透明环氧树脂胶水直接粘贴在陶瓷基板的适当位置，通过热超声金丝球焊工艺串并连接芯片之间的正负电极，并将首尾两颗LED芯片的正负电极分别与外电极的正负电极键合连接，在“围坝”内部灌封混有荧光粉的透明硅胶。



图4-39 陶瓷基板多芯片封装LED光源模组

该类照明模组具有如下优点：

(1) 可靠性高：由于芯片材料与陶瓷材料间的热膨胀系数近乎匹配，可以在很宽的环境温度范围、更大的工作电流下工作，避免了因热应力适配造成的键合金丝断裂；

(2) 光效高：氧化铝陶瓷基板对可见光的反射率高达92%，采用透明环氧树脂胶水粘贴工艺贴片后，可以充分发挥氧化铝陶瓷基板的优势，有效利用芯片的后向反射光；

(3) 绝缘性好：利用陶瓷基板的优异电绝缘特性可使该类光源模块获得极高的击穿电压。

该类光源模块的典型输入电功率为1～10W，色温2500～6000K，发光角160°、光效可达120lm/W，工作电压最高可达220V，可以用于交流直接驱动LED光源，适合于高可靠性的射灯、筒灯、球泡灯等应用。

4.4 LED芯片级封装

由于芯片级封装的LED器件可在高于一倍标称工作电流下仍能正常工作，且输出光通量几乎保持线性增长。这些特性对进一步降低每千流明价格具有诱人的前景，使得整个行业对倒装LED芯片及相关的芯片级封装技术充满期待。

4.4.1 芯片级封装LED器件

按照J-STD-12标准定义，芯片级封装(chip scale package，CSP)是指封装外壳的尺寸不超过裸芯片尺寸1.2倍的一种先进封装形式，用于LED的CSP封装是近年开始备受关注的一种先进封装技术，采用图4-40所示的新型倒装LED芯片及保型荧光粉涂覆技术制作出了新型小型化LED器件。

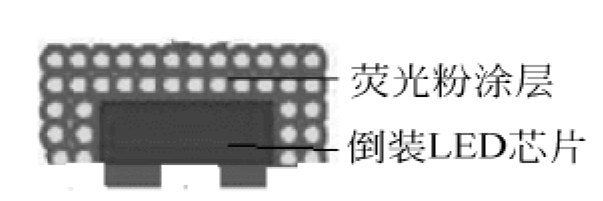
1. LUXEON Q系列LED器件

LUXEON Q系列LED器件是Philips Lumileds公司于2013年推出的采用新一代

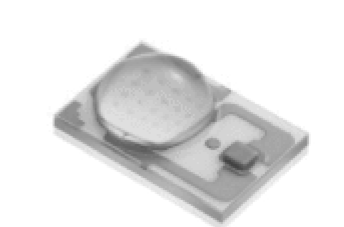
倒装芯片技术，即不需要在芯片工艺后段制程中剥离蓝宝石衬底的倒装 LED 芯片。将倒装芯片共晶焊接在氧化铝陶瓷基板上，该基板尺寸为 3.5mm²。采用薄膜金属化工艺在陶瓷基板两面分别制出镍-金的内外电极，并通过金属化过孔连接内外电极。将倒装 LED 芯片共晶焊接在陶瓷基板内电极相应位置，并在芯片外部保型涂覆黄色荧光粉混合胶体。具有体积小、光效高、可靠性高的优势。色温为 4000K 的 LUXEON Q 系列 LED 在 85℃、350mA 下的光通量为 115lm，将驱动电路增加至 1000mA 时光通量仍可达 300lm 以上。LUXEON Q 系列 LED 的产品定位为直接取代市场上已相当成熟、应用广泛的 3535 系列产品，应用范围包括天井灯、崁灯、外墙灯、替换型灯泡与特殊灯具应用。该器件的照片见图 4-40(b)。

2. PFC 系列 LED

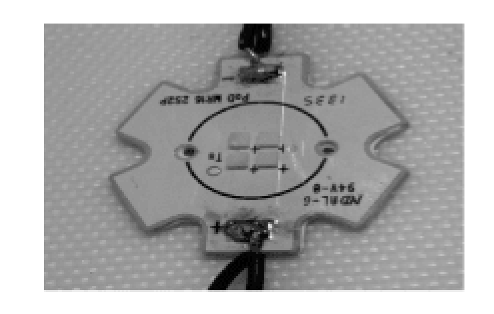
PFC 是 package free chip 的英文缩写，PFC—LED 的中文意思为“无封装芯片”LED 器件，见图 4-40(a)。该系列产品由台湾璨圆光电公司设计生产，直接在倒装 LED 芯片表面保型涂覆黄色荧光粉，使用中直接将 PFC—LED 的电极焊接在电路基板上，见图 4-40(c)上。此外，台湾晶电公司推出的 ELC(embedded LED chip，嵌入式 LED 芯片)、台积固态照明公司推出的 PoD(phosphor on die，荧光粉涂覆在裸片)等产品与 PFC 的原理、产品结构、性能均类似。另一类 PFC 将 LED 芯片嵌入与其同厚的保护材料内再在其上部贴装荧光粉膜片，它的发光均匀性好，但由于挡住了芯片四周的出光其光效会降低。还有一类为先用荧光粉膜片覆盖芯片，再用透明硅胶覆盖切割成型，其光色均匀性最好，但工艺复杂。



(a) 芯片级封装LED器件示意图



(b) LUXEON Q系列



(c) PFC系列制作的4W射灯光源模组

图 4-40　芯片级封装 LED 器件

PFC 类 LED 器件的优势为省略了支架或基板等材料，省略了键合金线及引线键合工艺，可以直接贴片在电路板上使用，具有结构简单、热阻低的优势。图 4-41 为采用瞬态热阻分析仪实测的 PoD 系列 LED 的热性能曲线，图中横轴为该器件的各结构层热阻分布，纵轴为热容量，由图可知芯片热阻约 1K/W。该器件在室温、350mA 驱动电流下的光效达到 120lm/W。

此外，该类 LED 的发光角度大于 160°，在平板电视液晶显示屏直下式背光源、直下式 LED 平板灯等应用中具有省略二次光学透镜的潜力，可进一步降低光效的耗损与光源成本。该类器件的潜在问题是芯片直接焊接在铝基板上由于热膨胀系数的不匹配产生的热应力，不仅会影响光电性能，甚至会造成失效、缩短寿命。LUXEON Q 系列 LED 器件是将芯片焊接在热膨胀系数与之匹配的陶瓷基板上，故可靠性更高。当然，如若使用具备热应力缓冲电极的芯片则可极大缓解这种失效。

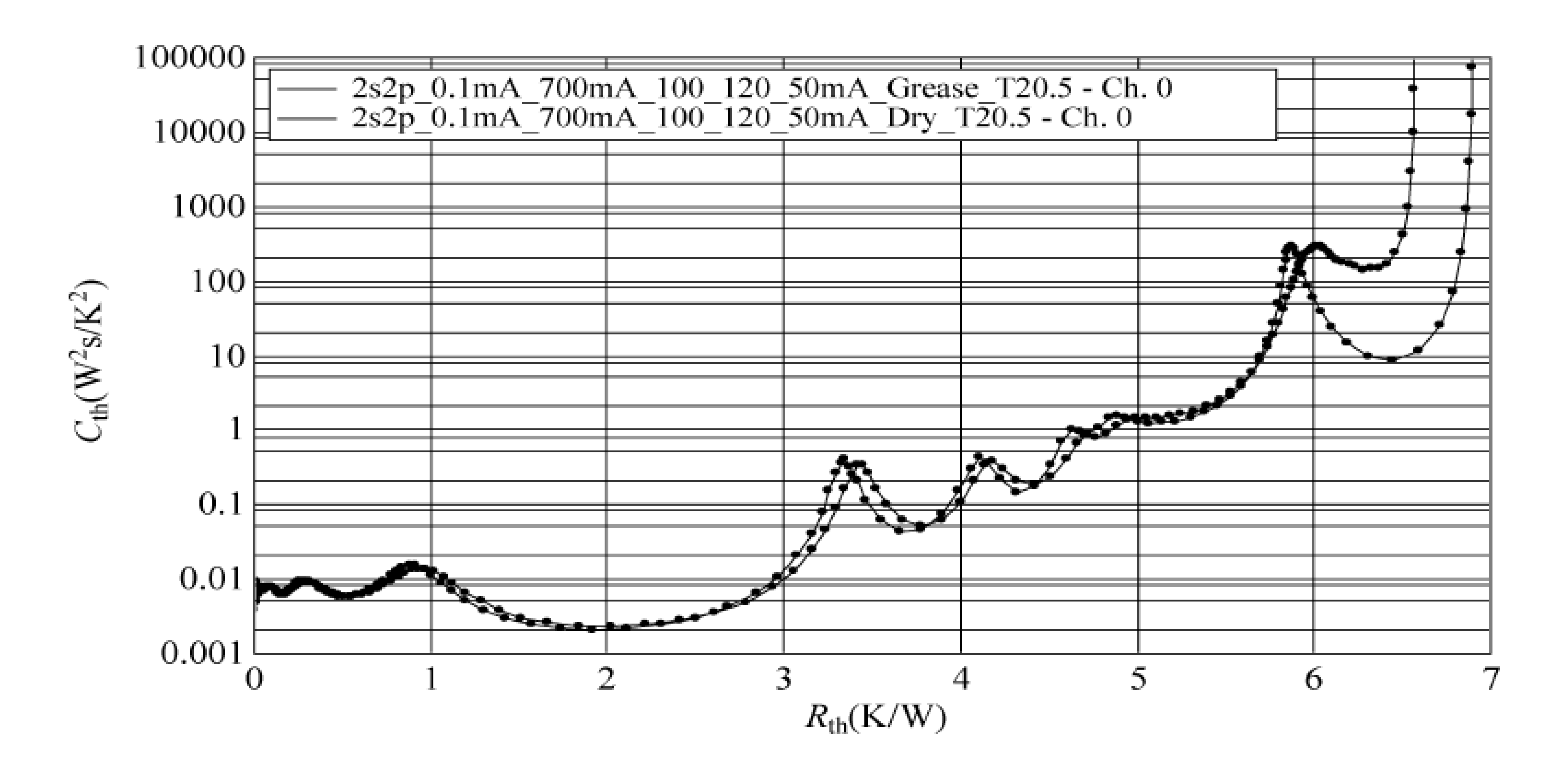
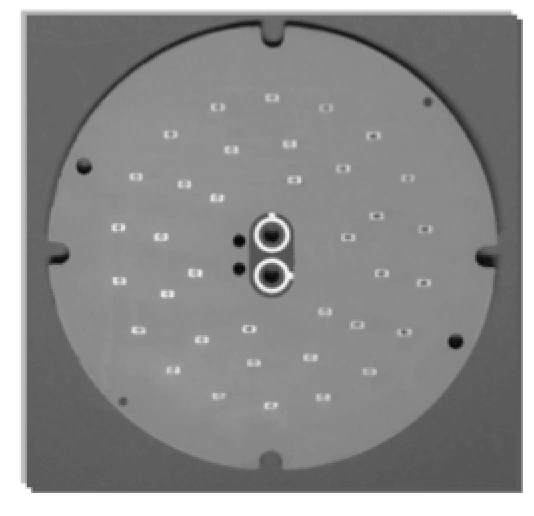


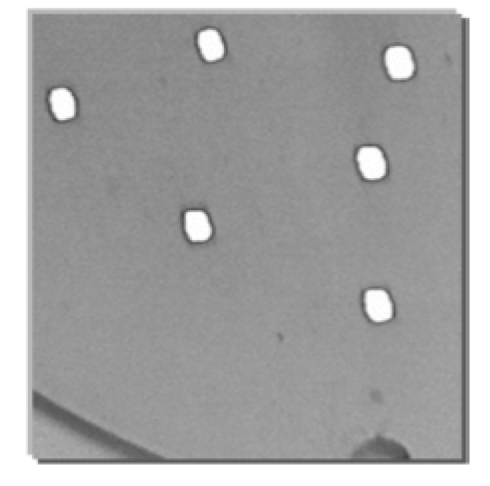
图 4-41 实测的 PoD 系列 LED 的热性能曲线

4.4.2 集成封装倒装 LED 光源模组

为满足一般照明应用大光通量输出的要求,也可在同一 PCB 基板上封装若干个较低功率倒装 LED 芯片制成集成封装倒装 LED 光源模组。图 4-42 为作者课题组研制的一种倒装 LED 光源模组,图中所用 PCB 板为铝基原位生长氧化铝基板,厚膜工艺印刷银钯导电浆料并高温烧结成膜,印刷焊膏后,将倒装 LED 器件直接贴片至电极相应位置,高温回流焊工艺焊接。该类光源模组的输入电压为 18～220V、工作电流 300mA、色温 2700～6500K、光效 110～120lm/W、显色指数(Ra)＞85、发光角度 120°以上。



(a) 一种集成封装倒装LED光源模组



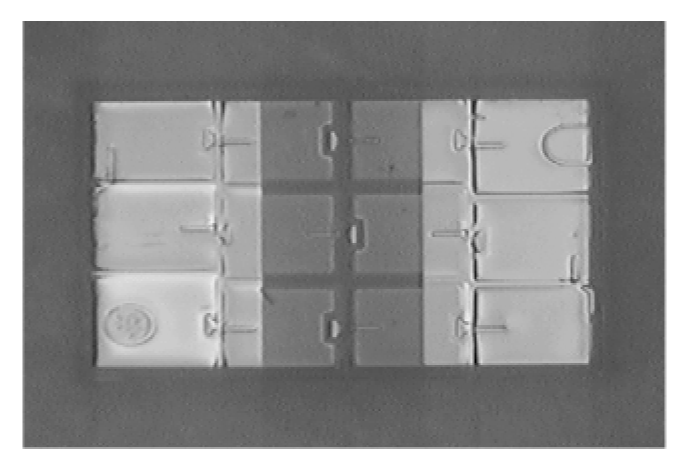
(b) 加电后局部

图 4-42 一种集成封装倒装 LED 光源模组(未涂覆荧光粉)及加电后局部

4.4.3 高压倒装 LED 光源模组

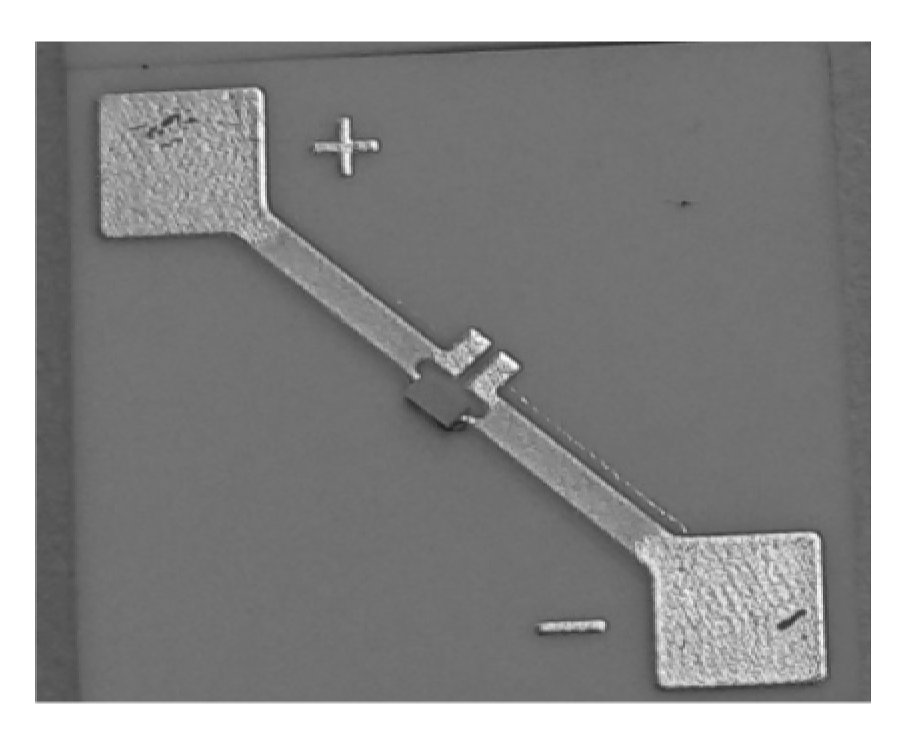
为减少光源尺寸与热阻、提高驱动电源效率,作者课题组开发了高压倒装 LED 芯片及相应的光源模组,图 4-43 为一种 36V 高压倒装 LED 芯片及照明模组的照片,图 4-44(a)为安装在氧化铝陶瓷基板上的一种 9V 高压倒装 LED 芯片制作的 PFC-LED 器件的照

片，图 4-44(b)为该器件的热性能曲线，由图可知该器件的热阻小于 1.5K/W，光效达到了 160lm/W。该器件与高效的高压线性电源 IC 封装为一体可以组成微小尺寸、高流明值的照明光源模组。

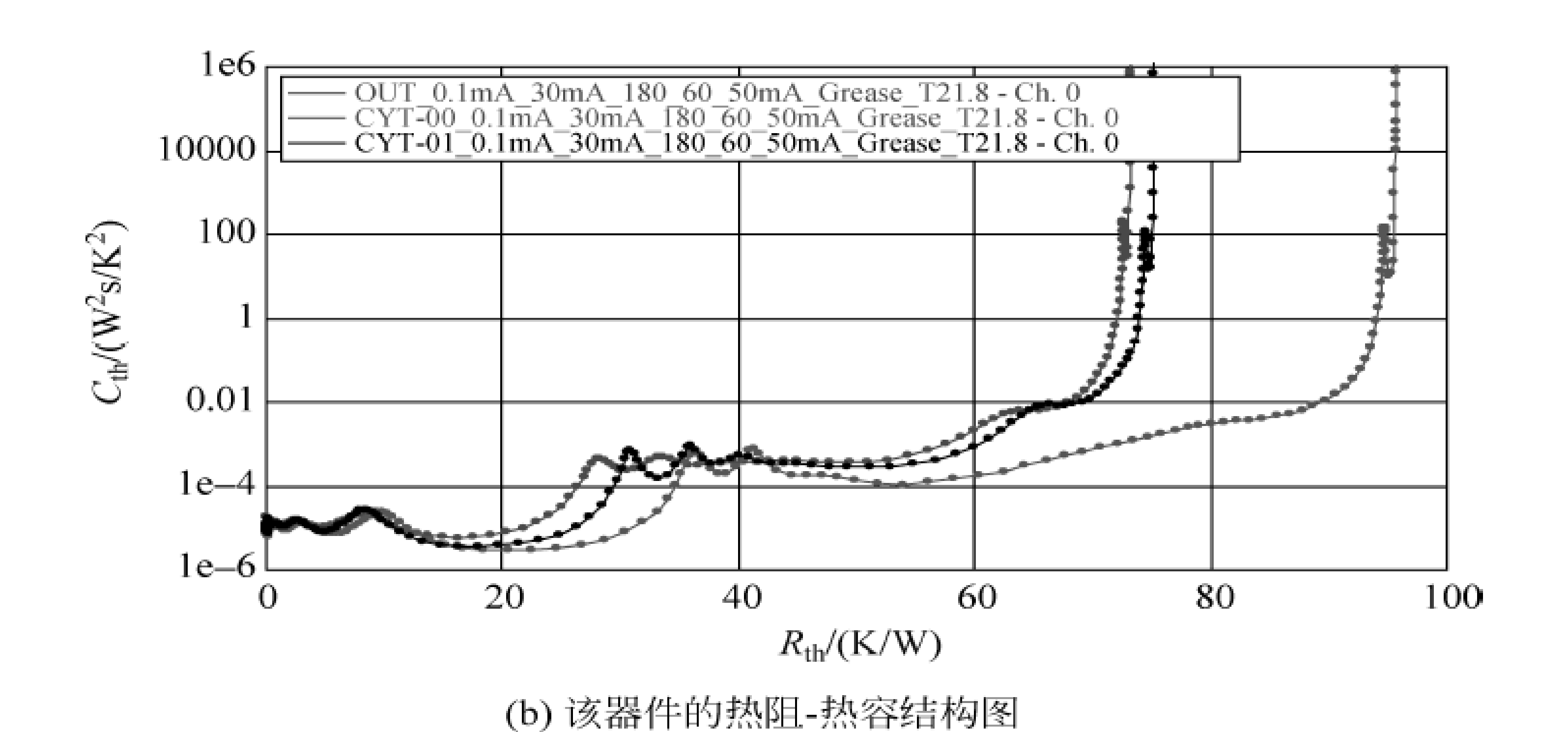


(a) 一种36V高压倒装LED芯片　　(b) 照明模组

图 4-43　一种 36V 高压倒装 LED 芯片及照明模组



(a) 安装在氧化铝陶瓷基板上的一种芯片级封装的高压倒装LED器件



(b) 该器件的热阻-热容结构图

图 4-44　安装在氧化铝陶瓷基板上的一种芯片级封装的高压倒装 LED 器件及该器件的热阻-热容结构图

4.5 封装中的热设计

4.5.1 热设计的分级

LED 相关的热设计仍属于电子设备热设计的范畴，包括如下三个层次：

(1) 系统级(systems)热设计，即对电子设备机柜、机框及子框级别的热设计；

(2) 封装级(packages)热设计，即对电子模块、散热器、PCB 板级别的热设计；

(3) 元件级(components)热设计，即对电子元件、器件、IC 级别的热设计。

系统级热设计主要研究电子设备如何通过热设计改善其工作环境，如通过强化的自然对流或强制对流快速散热，使电子设备始终处于适宜温度环境下工作，确保其性能和可靠性。而该环境温度和对流状态又是封装级热设计中的边界条件。如交换机机柜、机框、子架的自下而上的“烟道”式结构设计，可以产生很强的自然对流效应，可以应对数百瓦级别的散热。若散热功率更高，可以在机柜顶端或低端增加排风扇，增大对流系数，可以应对千瓦级别的散热。

封装级热设计主要研究电子模块等组件如何通过热设计改善其工作环境，一般情况下，电子模块包含了简单的散热器。如将翅片散热器通过导热脂安装在 CPU 管壳上部，再在散热器上方安装一排风扇，如图 4-45 所示。更高散热要求下可以将热管的冷端贴装在 CPU 管壳上部，其热端与一安装排风扇的散热器紧密相连，散热器的热量通过机箱的导热孔排到空气中。

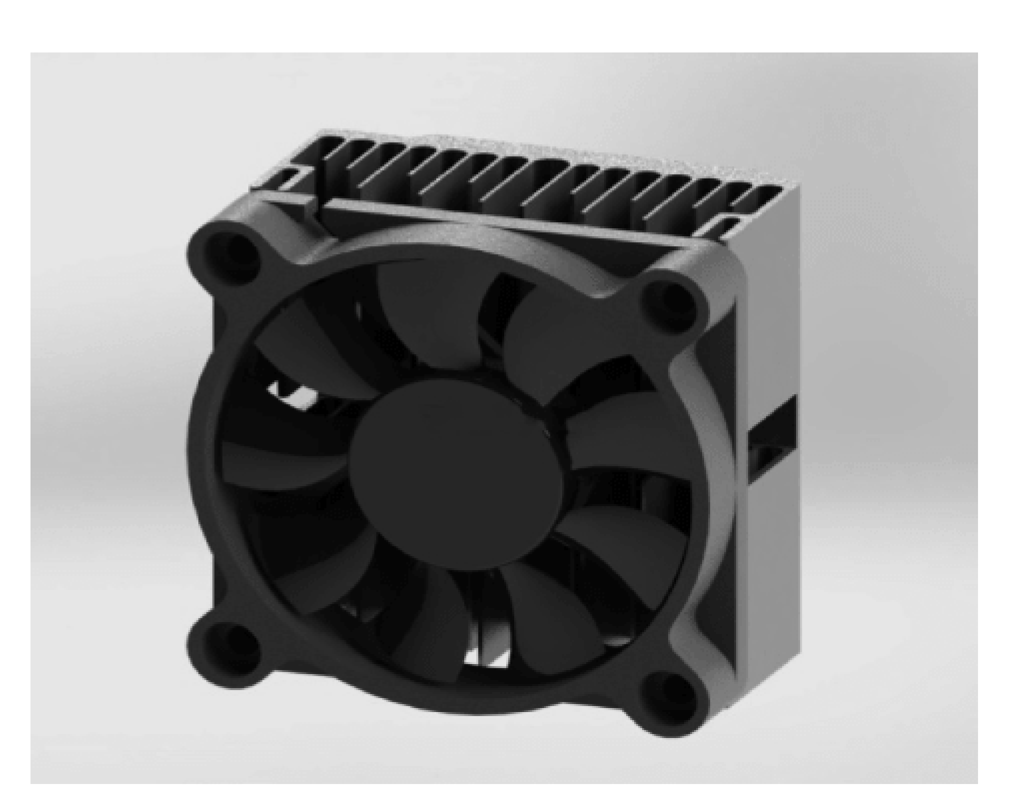


图 4-45 常规的 CPU 散热器

一般情况下，电子元件、器件不包含散热器，元件级热设计主要研究电子元件、器件如何通过合理的热设计将其产生的热量从芯片、元件中快速传导至散热器，以改善其工作环境。

LED 封装的热设计可归类到元件级热设计，而 LED 光源与灯具的热设计可归类到封装级热设计，大型 LED 灯饰的热设计可以借鉴系统级热设计的思路。LED 封装热设计将主要讨论热传导的问题，LED 灯具热设计将主要讨论热对流、热辐射的影响。

4.5.2 LED 器件的典型散热通道

一般的 LED 光源均为多颗 LED 器件安装在铝基板或陶瓷基板上构成串并联阵列，假设各 LED 器件间的间隔大到无热耦合效应，取其一只分析它的散热通道，如图 4-46 所示。由图可知，该器件为表面封装 LED，透镜为透明环氧树脂模压制成，芯片焊接在制有内电极的陶瓷基板上，通过金丝球焊将芯片电极和基板内电极电连接，基板外电极与铝基板相应电极焊接为一体，基板与铝基板间涂抹导热脂。加电工作后，LED 的热量通过以下四个途径散热：

(1) 散热通道 1：芯片有源区热源产生的部分热流从管芯传导至透镜，在透镜表面通过热对流、热辐射散热至空气；

(2) 散热通道 2：一部分热流通过从管芯依次传导至焊料、热沉基板、导热脂、散热器，在散热器表面通过热对流、热辐射至空气中；

(3) 散热通道 3：一部分热流通过从管芯依次传导至热沉基板上的金属电路层、散热器；另一部分通过键合金丝传导至热沉基板上的金属电路层、散热器，在散热器表面通过热对流、热辐射至空气中；

(4) 散热通道 4：一部分热流通过从管芯依次传导至焊料、热沉基板的金属电路层、导热脂、散热器，在散热器表面通过热对流、热辐射至空气中。

该系统的等效热阻网络如图 4-46(b)所示，R_{chip}、R_p、R_{cer}、R_{TIM}、R_{MPCB}、R_{gold}、R_{copper}、$R_{s\text{-}d}$ 依次为芯片、导电胶、陶瓷基板、导热膏、MPCB 板、金丝、铜电路层、硅胶透镜的热阻，R_{conv} 为散热器表面通过热对流、热辐射至空气的热阻。

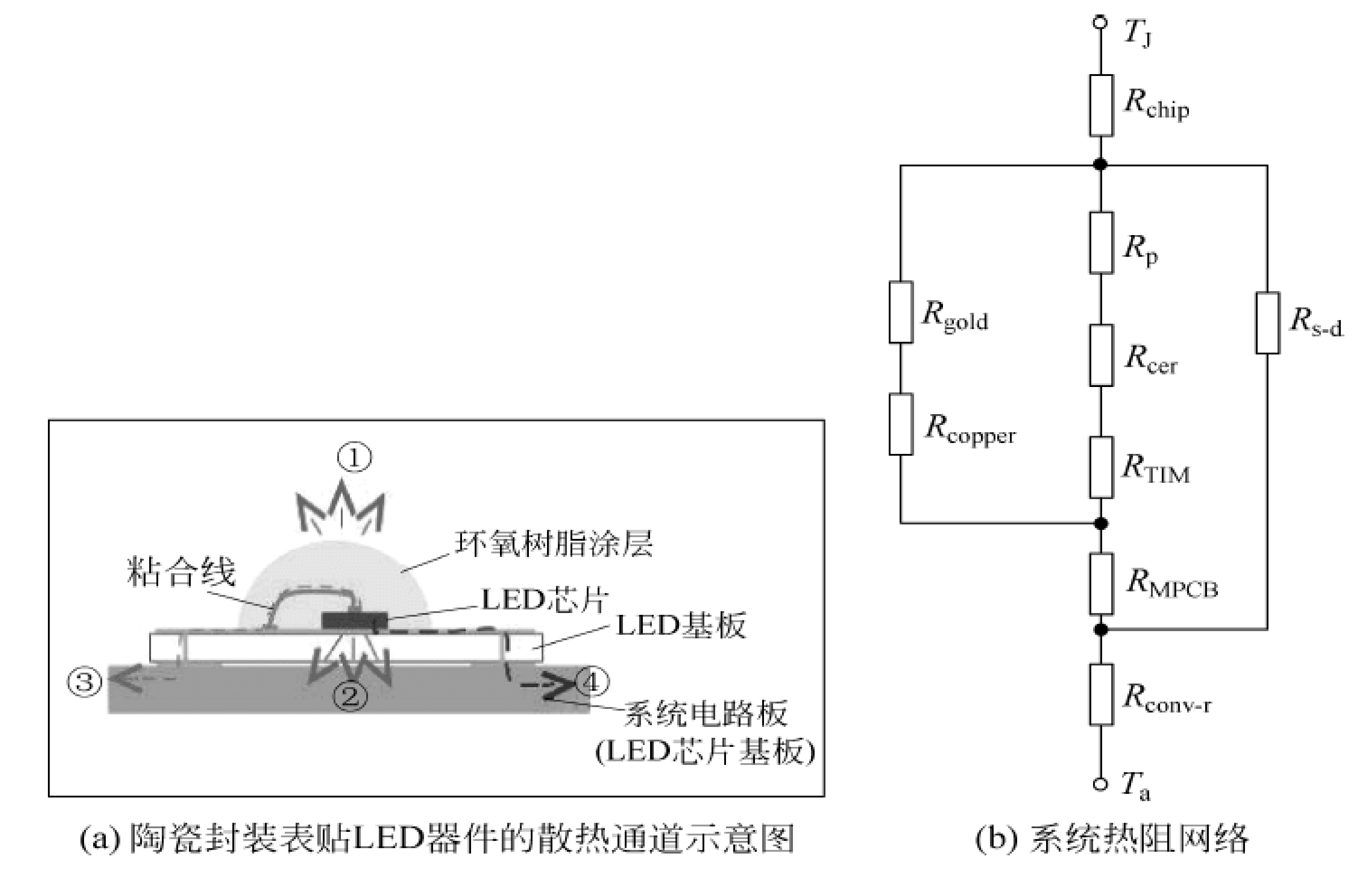


图 4-46 陶瓷封装表贴 LED 器件的散热通道示意图及系统热阻网络

各导热通道的分析如下：

(1) 透镜材料多为透明环氧树脂胶、硅胶胶体或为 PC，其热导系数＜1W/(m·K)远

低于其他材料，尺寸也通常大于热沉，相应的传导热阻约在 10^3K/W 量级以上，故通道 1 为次要散热通道，在低热阻封装结构热设计中可以忽略不计；

(2) 若热沉的导热系数较高、面积较大，如氮化铝、氧化铝陶瓷或加导热金属座的支架管壳，相应的传导热阻约在 10K/W 量级左右，通道 2 部分为主要散热通道；

(3) 最常用键合金丝的直径为 20～25μm、一般长度在 1～2mm 左右，每毫米的热阻约 10^4K/W 量级，通道 3 所能传导的热量有限，可忽略。

(4) 铝基 PCB 基板绝缘介质层的导热率小于 1W/(m·K)，远小于金属铜基电路层，通道 4 部分为次主要散热通道。

4.5.3 封装中的热设计方法

LED 封装热设计的目的为将 LED 芯片产生的高热流密度快速传导至热沉转换为低热流密度，最终通过应用产品的散热器将热量通过对流和辐射传递至空气中，从而保持 LED 的结温在合理的范围(LED 芯片厂家给出的最大结温值)内。具体地讲，包括：

(1) 保障 LED 器件始终工作在合适的条件下，确保其高的可靠性；

(2) 杜绝在超应力条件下对 LED 的驱动，延长其寿命；

(3) 在不影响可靠性的前提下适当提高工作电流密度，降低流明成本(klm/$)。

1. 热设计方法

常用的热设计的方法包括热阻分析法和和热场分析法如下：

1) 热阻分析法

(1) 模型与方法：依据热阻网络公式，将构成 LED 器件的封装结构的每一部分均作为热阻网络的一部分热阻，在知道各部分材料的热导率、厚度和面积后即可求得各部分热阻和封装的总热阻，分析出对封装热阻影响最大的部分，在已知的工作条件下即可反推得到 LED 的结温，需要注意的是在绝大多数情况下要考虑扩散热阻的影响。

(2) 局限性：该方法从一维热传导导热公式推出，不能精确讨论热对流、热辐射散热的影响。

(3) 优点：热阻网络结构简单、清晰。

(4) 缺点：精度低，无法研究横向热场分布，仅能分析稳态热阻。

2) 热场分析法

(1) 模型与方法：模型的建立与热阻分析法类似，需要注意的是在研究封装与应用的热问题时，可以将 LED 芯片近似为单一材料构成的发热体，这样可以简化封装与应用的求解过程，精度也可以达到使用的要求，使用公式(1-6)求解热场分布。

(2) 优点：精度高，可处理三维热传导与对流散热、辐射散热问题，不仅能分析稳态热阻，还可分析瞬态热阻。

(3) 缺点：计算困难，很难有解析解。

3）改进的热场分析法(流体力学分析软件)

(1) 模型与方法：模型的建立与热阻分析法相同，需要注意的是在研究封装与应用的热问题时，可以将 LED 芯片近似为单一材料构成的对称六面发热体，这样可以简化封装与应用的求解过程，精度也可以达到使用的要求。将上述数据带入 CAD 制图软件制出模型几何图形，并按照预计热流密度的大小规划出疏密程度不一的网格，再将此模型导入热分析软件仿真处理。

(2) 设计流程：以 ANSYS 仿真软件为例给出 LED 封装的热设计流程：设定结构基本参数；选择单元类型；定义材料参数；建立几何模型；赋材料属性；划分网格；施加载荷并求解；查看温度分布图；热平衡分析。

(3) 优点：图形化输入模型，图形化输出热场分布，可求得稳态热阻和瞬态热阻，最终可求出各层结构的热阻以及给出不同散热条件下的热场分布。

2. 封装中的热设计

以 ANSYS 仿真软件为例讨论一种 COB 封装的功率 LED 器件的封装热设计。使用的芯片为 Cree 公司生产的 SiC 衬底的垂直结构 1W 功率型 LED 芯片，LED 芯片结构如图 4-47 所示。将该芯片分别封装在铝基氮化铝基板(铝基体上溅射氮化铝薄膜电隔离层，再溅射、电镀铜膜电路层)和铝基氧化铝基板(铝基体上原位微弧氧化或硬质氧化生长氧化铝薄膜电隔离层，再溅射、电镀铜膜电路层)上，使用金锡焊料将 LED 芯片共晶焊接在电路层上。为简化仿真起见，忽略了铜膜电路层。分别仿真讨论氮化铝薄膜、氧化铝薄膜热导率对芯片结温的影响。封装模型各部分的参数如表 4-7 所示。由于芯片和封装基板均为四方形，为减少模拟的工作量，用对称的方式截取整体模型的 1/4 建立的有限元模型见图 4-48。

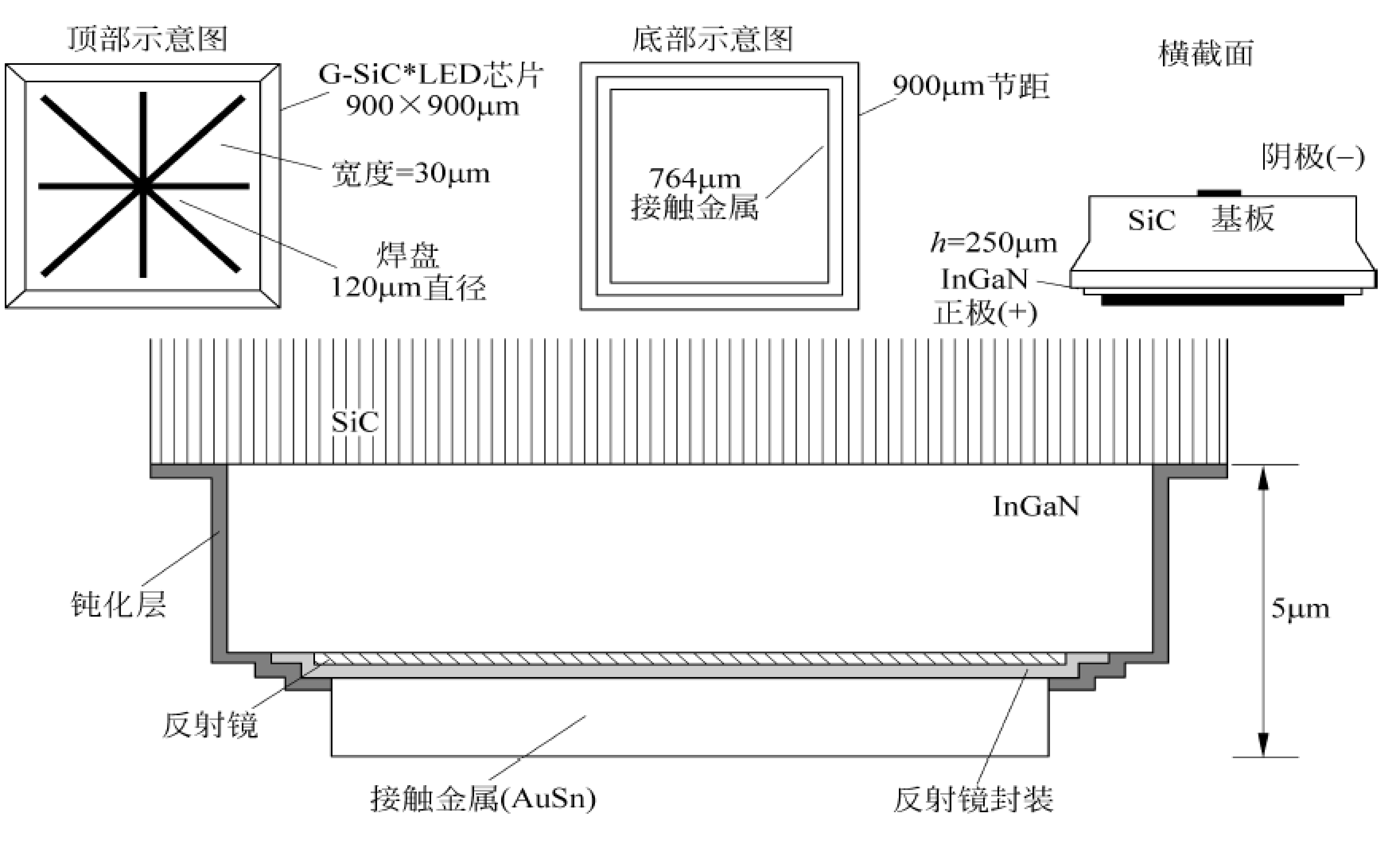


图 4-47 Gree 公司的垂直结构 1W 功率型 LED 芯片结构

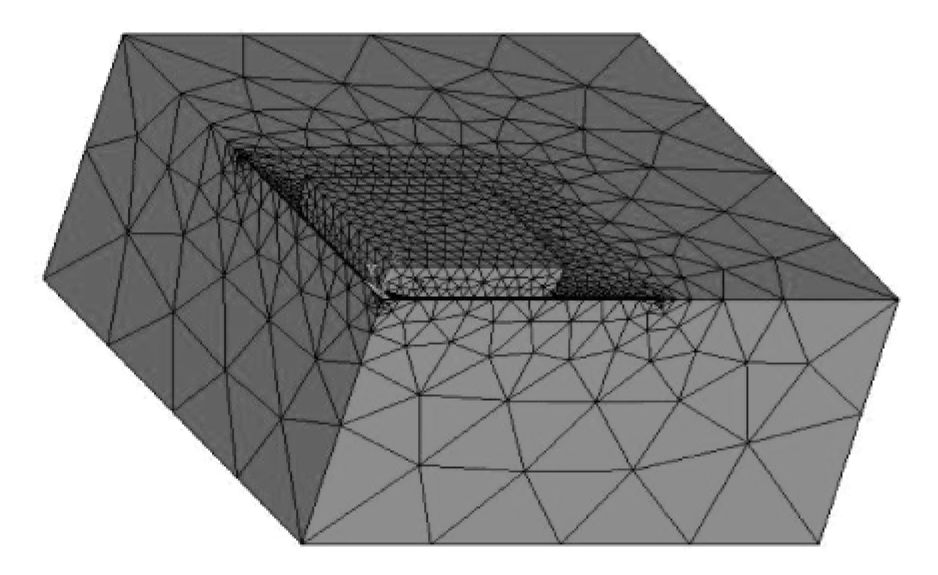


图 4-48　铝基氮化铝基板 LED 封装模型的网格划分

表 4-7　氮化铝封装模型的数据

材　　料	SiC	GaN	AuSn	AlN	Al	备　　注
长/mm	1	1	1.6	3/4	3/4	AlN 的热导率以 100 为基准，200 /20 用以比较。Al 基大小以 3 为基准，4 用以比较。
宽/mm	1	1	1.6	3/4	3/4	
厚	100μm	3μm	2μm	4μm	0.8mm	
热导率/W/(m·K)	250	130	57	100/200/20	200	

外部环境温度设为 20℃，LED 输入功率 1W。采用稳态条件来模拟封装内部、芯片有源区和 SiC 衬底的温度场分布，分别见图 4-49 和图 4-50。图 4-51 从左到右分别为 AlN 的热导率取值 200W/(m·K)和 20W/(m·K)时的温度分布。根据芯片最高温度来推算封装结构模型的热阻(内部通道热阻)约为 2K/W。虽然在铝基上生长出的多晶 AlN 膜的热导率比 AlN 陶瓷小近一个数量级，但由于 AlN 膜非常薄，所以，其热导率对于封装的总热阻几乎没有影响。

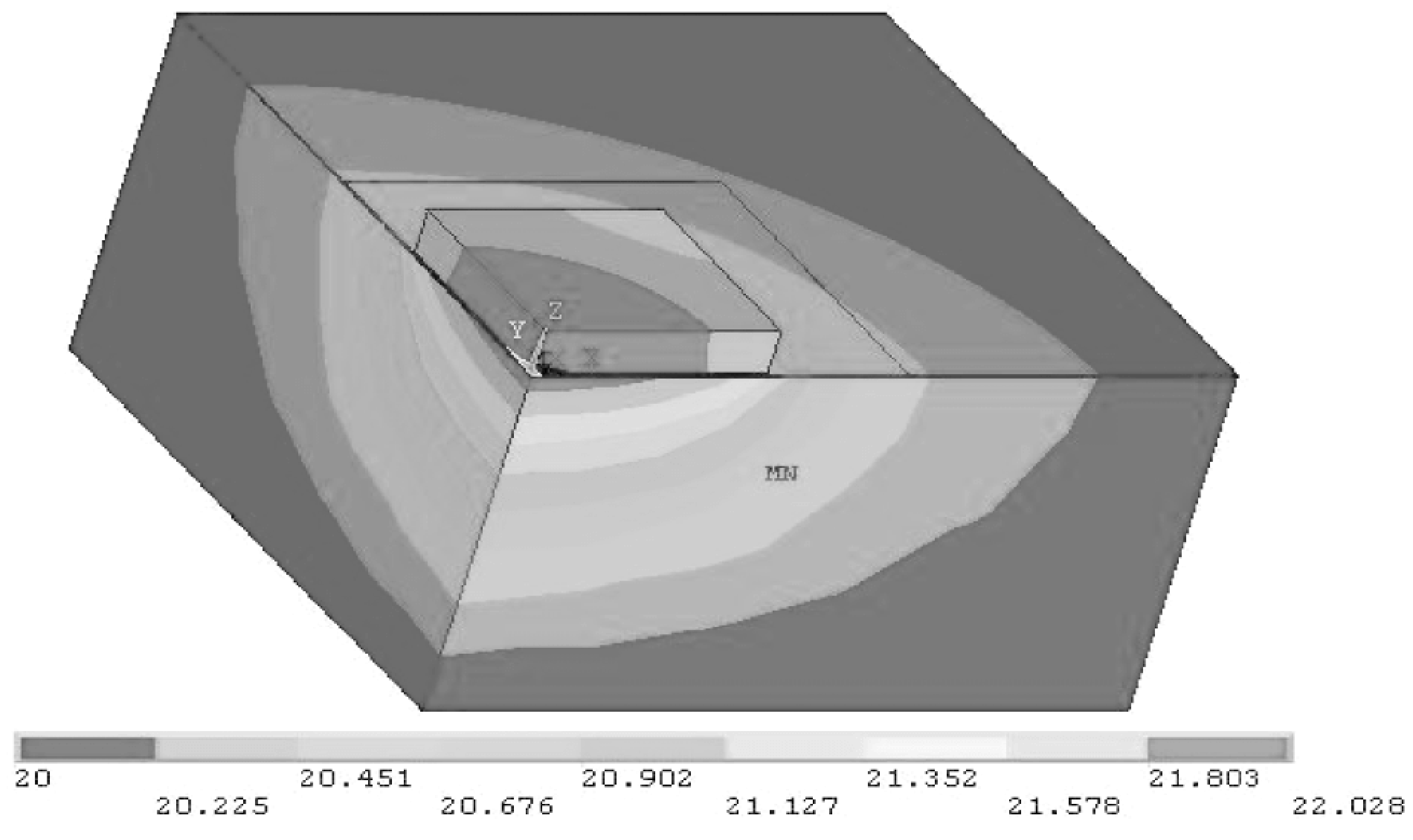


图 4-49　内部通道热阻模型的温度场分布等值线图

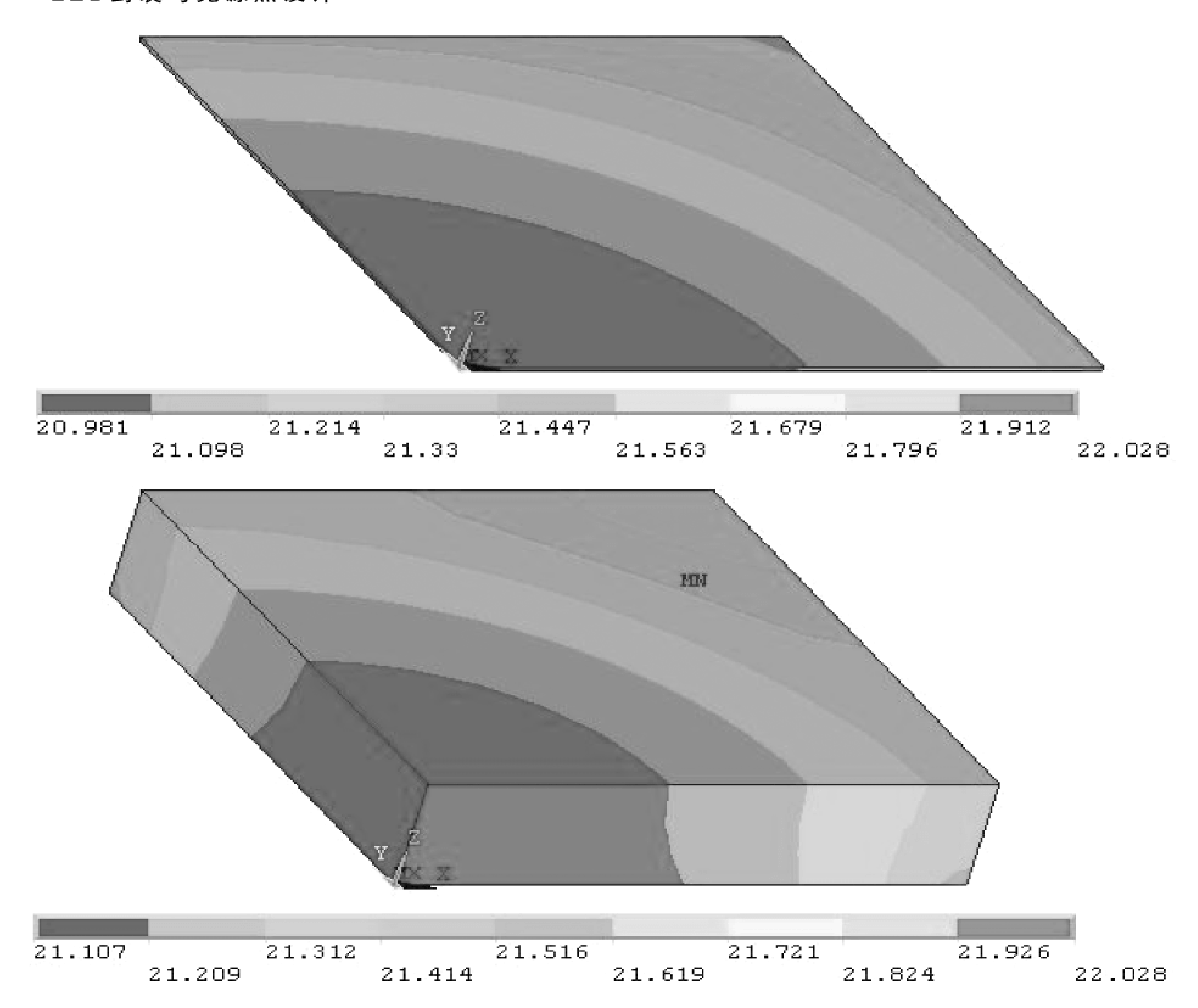


图 4-50　芯片有源区和 SiC 衬底的温度场分布

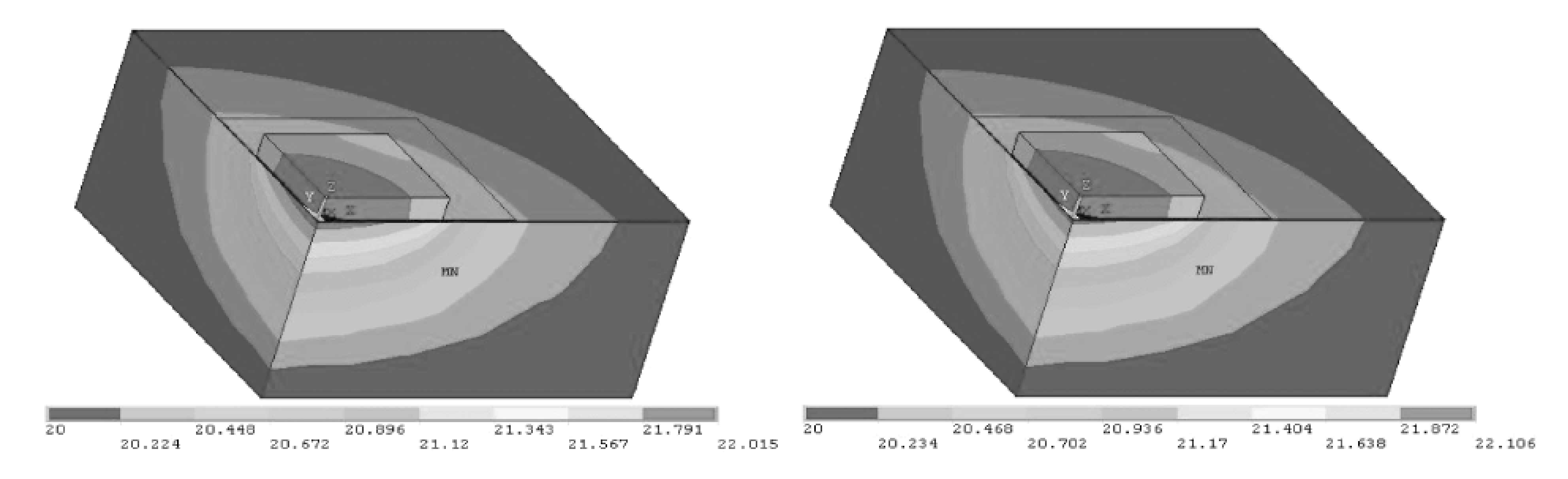


图 4-51　AlN 的热导率取值 200W/(m·K)/20W/(m·K)时的温度分布

作为对比，将氮化铝薄膜替换为氧化铝薄膜，并考虑氧化铝薄膜上铜膜电路层的影响，此时的封装模型及网格划分如图 4-52 所示，仿真参数如表 4-8 所示。

图 4-53 为热扩散层、氧化铝、铝的长宽分别取值为 2mm、4mm 和 4mm，其厚度分别取值为 20μm、20μm 和 500μm 时内部封装和芯片的温度分布，推算出封装热阻约为 6.4K/W。

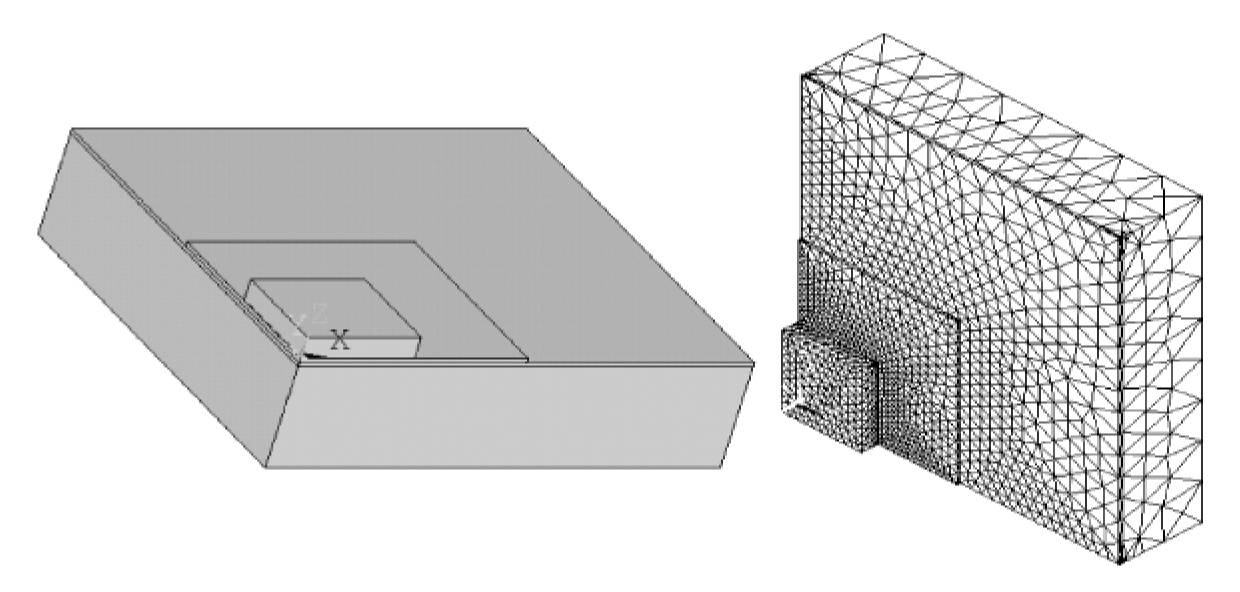


图 4-52 铝基氧化铝基板 LED 封装模型及网格划分

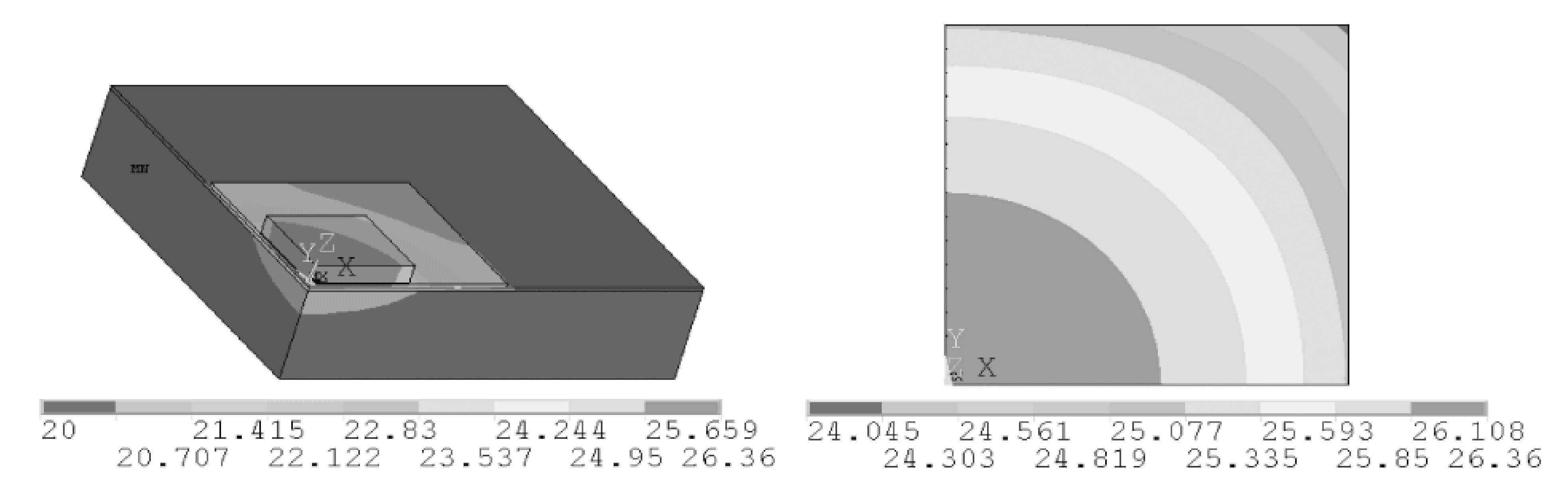


图 4-53 A01 方案内部封装和有源层的温度分布

图 4-54 为热扩散层、氧化铝、铝的长宽分别取值为 2mm、4mm 和 4mm，其厚度分别取值为 2μm、20μm 和 500μm 时内部封装的温度分布，推算出热阻大约为 9K/W。

表 4-8 氧化铝薄膜封装模型数据

材　料	SiC	GaN/AlGaN	焊接层	热扩散层	氧化铝	铝
长/mm	1	1	2	2/4	4/20	4/20
宽/mm	1	1	2	2/4	4/20	4/20
厚/μm	100	3	2	2/20	40/20	500/5000
热导率/W/(m·K)	250	130	57	400	2	200

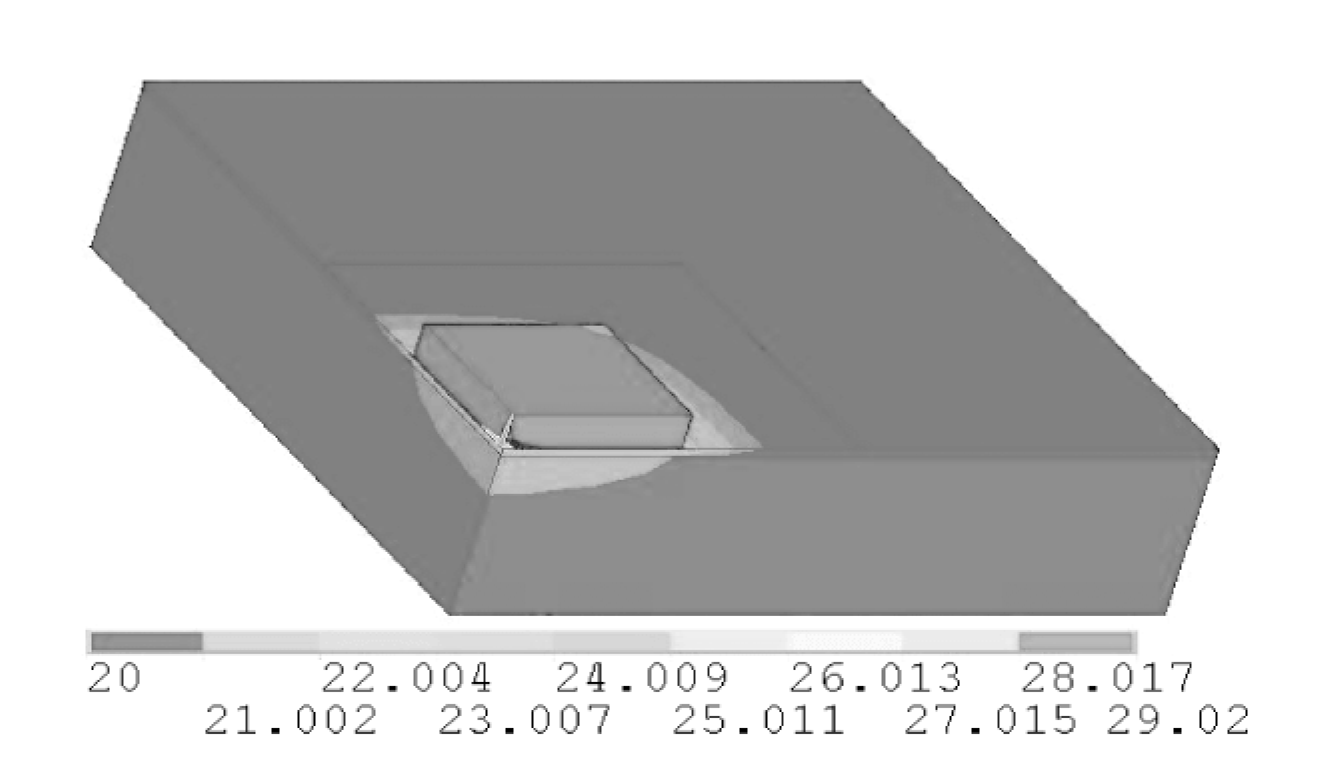


图 4-54 A02 方案的温度场分布等值线图

由上述模拟分析可知：

(1) 与芯片最接近的结构层(焊料层、金属电路层)的物理性能对封装热阻产生的影响最大；

(2) 上述层选用高导热率材料十分必要；

(3) 若金属电路层下为热导率低的材料(如氧化铝)，则该层厚度对封装热阻的影响有限；

(4) 焊料层尽量薄些，对减少封装热阻有利。

通过在 LED 芯片或是在基板电路层焊接垫处溅射或电镀约 3μm 的金锡合金层，在共晶焊接质量优良的条件下，可以获得最低的封装热阻，但共晶焊接的生产效率很低，而采用焊膏贴片的焊接层厚度一般在 10～20μm，也可获得较低的封装热阻，生产效率最高，但需注意控制好焊接层的空洞率；采用导电胶贴片工艺，其胶层厚度一般在 20μm 以上，封装热阻最高，但其生产工艺最成熟、贴片质量最容易控制。

思考题

1. 封装层级之间的关系是什么？
2. 试说明 LED 封装的作用与 IC 封装的异同点。
3. 封装设计中为何必须考虑可制造性成本与可制造性设计？
4. 影响 LED 封装可靠性的因素有哪些？
5. 有哪些小功率 LED 支架？为何它们的热阻较高？
6. 有哪些大功率 LED 支架？为何它们的热阻较低？与其他支架相比陶瓷基板支架的突出优势是什么？
7. 使用银胶和焊膏需注意的问题有哪些？
8. 何为共晶焊接？共晶焊的原理与优势是什么？共晶焊的最大问题有哪些？举例说明。
9. 讨论使用金线、铝线、铜线键合的特点及需注意的问题。
10. 讨论 LED 封装的基本工艺，大功率 LED、小功率 LED 封装工艺中各自最关注点是什么？
11. 引线键合的基本过程和原理各是什么？
12. 选择激光划片机种类的主要原则是什么？
13. 试讨论等离子清洗的原理与必要性。
14. 试讨论 LED 封装的基本结构。
15. 试讨论减小 LED 封装热阻的基本方法。
16. 讨论功率型 LED 封装的特点及实现方法。
17. 试讨论 MCM 封装 LED 的特点与实现方法。
18. 何为 LED 的芯片级封装？举例说明其结构、特点及使用中注意的事项。
19. 讨论热设计中的分级。
20. 讨论 LED 的散热通道及主次热阻。
21. 封装中热设计的目的是什么？

22. 封装中热设计的主要方法是什么？各自的特点是什么？

习题

1. 试计算安装在散热器上的1W功率LED室温下的结温，设LED器件热阻 R_{thjs} 为10K/W，铝基板热阻 R_{thsb} 为13K/W，散热器对流热阻 R_{thba} 为40K/W，输出光功率为0.3W。

2. 试计算采用不同贴片工艺的1W-LED封装热阻，芯片面积 $1mm^2$，(1)透明环氧树脂，胶层厚度15μm；(2)导电银胶，胶层厚度20μm；(3)SnAgCu焊膏，焊料层厚度10μm；(4)金锡共晶焊料，焊料镀层厚度3μm。

3. 试分别画出并计算两种封装的等效热阻网络、各热阻值和总的热阻，(1)直插式LED，支架为纯铜质、长度10mm；(2)氧化铝陶瓷基板封装LED，板厚0.4mm。不考虑横向热传导。芯片为垂直结构，键合引线长度2mm，其上均制有直径4mm的环氧树脂半球透镜，芯片位于透镜中心。并讨论导热主通道。

4. 画出Luxeon系列LED器件的热阻网络，并计算出器件热阻。见图4-31。

5. 一LED筒灯光源模块，采用80只0.06W的LED器件，电路逻辑结构为20串4并，使用透明环氧树脂将其粘贴在0.38mm的氧化铝陶瓷基板电路层上，胶层厚度10μm，芯片衬底为蓝宝石，厚度100μm，长宽为350μm，在不考虑扩散热阻与芯片间热耦合的前提下，试计算总热阻。

6. 采用图3-13所示的倒装LED芯片制作一款FPC器件，芯片外包覆一层20μm黄色荧光粉，设芯片有源区距离电极5μm，铜电极厚度2μm，计算其热阻。

第5章 LED光源组件与灯具热设计

5.1 LED 照明组件与灯具的定义

半导体照明产品及产业正处于蓬勃发展的时期，相关的技术标准也在同步建立健全的过程中，广东省 LED 照明标准光组件项目工作组根据 LED 照明产品特点、产业链分工和应用习惯，提出将 LED 照明组件分为 6 个层级。

(1) 层级 0(level0)：外延及芯片；

(2) 层级 1(level1)：封装组件；

(3) 层级 2(level2)：照明模组；

(4) 层级 3(level3)：照明光源；

(5) 层级 4(level4)：一体化灯具；

(6) 层级 5(level5)：照明系统。

封装组件：采用 LED 封装工艺将发光芯片、光学部件、电极引线、组件承载体结合为一体的独立的基本发光单元，如 2835 等 LED 器件即为典型的封装组件。

照明模组：包括但不限于若干封装组件和线路基板组成的 LED 照明产品的中间件，可以附带层级间的接口连接器或部分驱动控制零件，如集成封装的 LED 光源模组即为典型的照明模组。

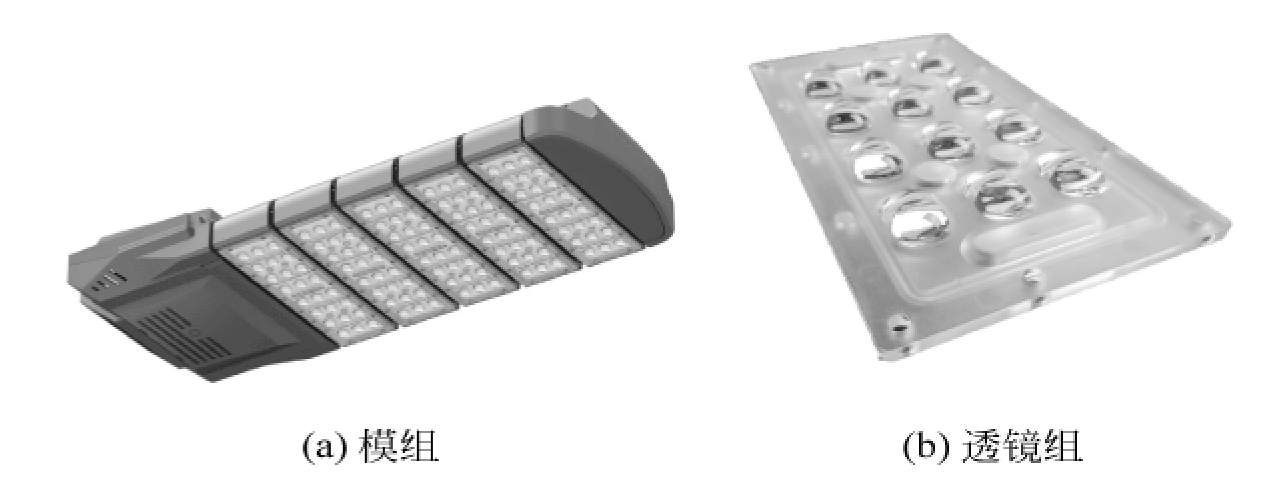
照明光源：具有相对完整的光机电热结构部件与层级间的接口连接器的 LED 照明产品中间件，是 LED 照明终端产品的核心发光单元。国外把照明光源叫做光引擎(lighting engine)。

一体化灯具：指功能完善、结构完整、可整体互换的独立照明的整体式光源或灯具。

5.1.1 LED 照明模组

按照上述定义可知 LED 照明模组是将 LED 器件及附属的光学部件安装在电路基板上的照明半成品，包括两部分：LED 芯片或器件及光学附件、电路板，并提供电接口、热接口和光接口。其电接口为与

LED 连接方式匹配的直流电压接口，通过该电接口与外接驱动电源连接。以 LED 路灯照明模组为例，见图 5-1 。图中 LED 器件焊接在铝基电路板上完成电气连接，并焊接引线作为电气接口；铝基板背面作为热接口，通过导热脂与散热器紧密连接散热；LED 的输出光通过集成透镜整形输出。



(a) 模组　　(b) 透镜组

图 5-1　LED 路灯模组及配套的透镜组

5.1.2　LED 照明光源

按照上述定义可知 LED 照明光源是以 LED 器件为基本发光体，具备规定的光、色、电、热特性，以及规定的外形尺寸、机械匹配形式、应用接口端和使用规范等特征，用于照明产品及照明系统的发光单元。LED 照明组件需包括三部分：LED 芯片或器件、驱动电源及附件(IC、EMC 器件、电阻、电容、电解、整流二极管)、电路板，并提供电接口、热接口和光接口。以典型的 LED 球泡灯为例，图 5-2 为 7W 球泡灯 LED 照明光源照片，图中 IC 为具有温度保护功能的高压四段线性驱动集成电路，220V AC 电源输入通过电源线与整流器连接，整流后的电压连接至驱动 IC 的电源端。该组件的热接口为铝基电路板背面(除去接插式电连接器和电源线所占位置外)，该面与球泡灯外壳的散热器平面通过导热脂紧密连接，将 LED 器件、驱动 IC 和整流桥等产生的热量传导至散热器，最终将热量散至空气。

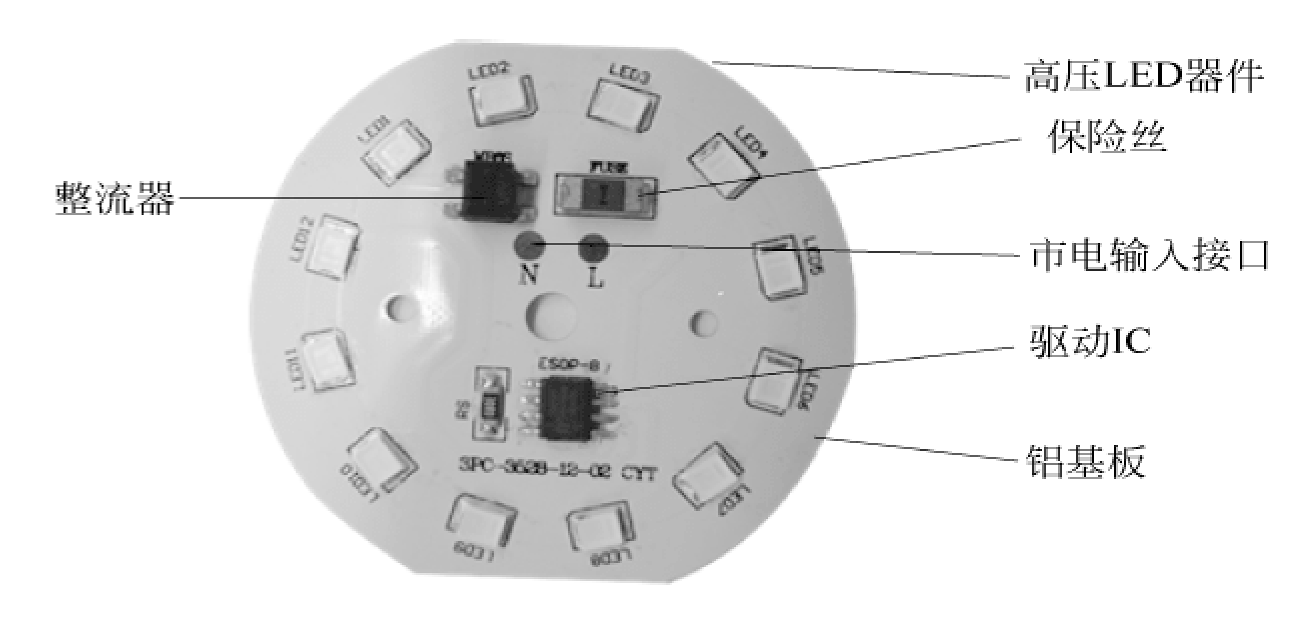


图 5-2　7W 球泡灯 LED 照明光源

5.1.3　LED 灯具

半导体照明灯具有保护、固定、连接电源、提供配光、点缀空间、美化环境等功能特

点，除光源外它还包括所有用于固定和保护光源所需的全部零部件，以及与电源连接所需要的线路配件，主要包括散热器、驱动电源及控制器、PCB灯板、LED光源、光学系统、界面材料等部分。

1. 散热器

一般将LED灯具的散热器与灯壳一体化设计，所以，除将来自PCB灯板的热量散发到外界环境外，散热器还要兼顾支撑PCB灯板和驱动电源的作用。小功率LED灯具散热器多采用普通PPA、塑包铝（铝衬支架外包覆PPA等塑料材料）、高导热塑料、陶瓷等材料；用于大功率LED灯具散热器的材料多为铸铝、挤压铝，外部通常进行阳极氧化处理。

散热器包括主动式散热器和被动式散热器两大类。主动式散热器是指含有如电风扇、微通道等可以产生强制对流效应的散热器，主要特征为需要外部的能量（多为电力）提高热对流系数，从而提高散热效率。如计算机主板CPU的风扇＋翅片散热器，通过电扇产生强制的对流空气，高效带走翅片散热器的热量，保证CPU工作温度低于80℃。微通道换热器是指通过微型水泵使纯净水等液态物体快速通过微通道换热器的微小通道（通道尺寸1mm以下），高效快速地带走热沉上热源的热量，体积换热系数达到50MW/(m^3·K)以上。虽然主动式散热器对流系数大、散热性能好，但其结构复杂、消耗外部能量、可靠性及寿命较短、成本高。主动式散热器还包括半导体制冷器，是利用半导体的珀耳帖效应散热的器件，单级热电堆可得到大约60℃的温差，冷端温度可达－10～－20℃。增加热电堆级数即可使两端的温差加大。半导体制冷器具有无噪声、无振动、不需制冷剂、体积小、重量轻、安全可靠、制冷量可调节等特点，但它的制冷系数较小，电耗量相对较大，主要用于半导体激光器芯片等小尺寸、高附加值产品的散热。因此，在半导体照明灯具中应尽量避免使用主动式散热器。

被动式散热器内部不含有任何有源器件，可以通过选择合适的材料、合理的结构设计提高对流系数，具有结构简单、成本低廉、安全可靠等优点，在半导体照明灯具中得到了广泛的使用，如图5-3所示的LED灯具散热器借助“烟筒效应”有效提高了自然对流系数。



图5-3 挤压铝筒灯散热器

2. 驱动电源及控制器

常用的驱动电源包括隔离式和非隔离式两大类。

1）隔离式驱动电源

隔离式驱动电源通过高频变压器来实现LED负载与电网的电气隔离，虽然电路复杂、成本较高、EMI较大，但安全性好、输入电压范围宽、可调光调色，是一种常用的LED驱动电源。图5-4为隔离式LED恒流驱动电源的基本结构。

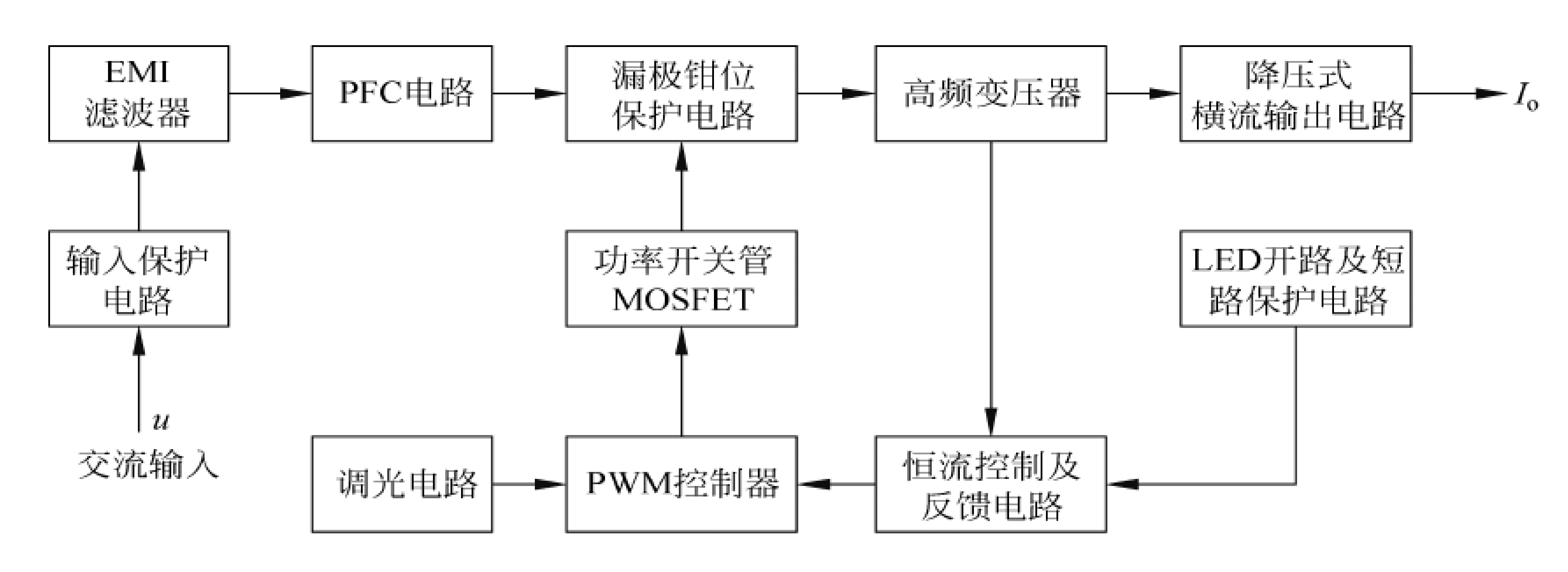


图 5-4　隔离式 LED 恒流驱动电源的基本结构

基本原理是采用功率 MOS 场效应管作为开关器件，周期性地间断式工作，通过调整占空比即可调整输出电压。由于隔离式驱动电源有变压器、电解电容等直插式电子元器件，体积比较大，遮光严重，只能制成单独的电源通过电气连线与 LED 光源板连接。图 5-5 为一种隔离式 LED 驱动电源。

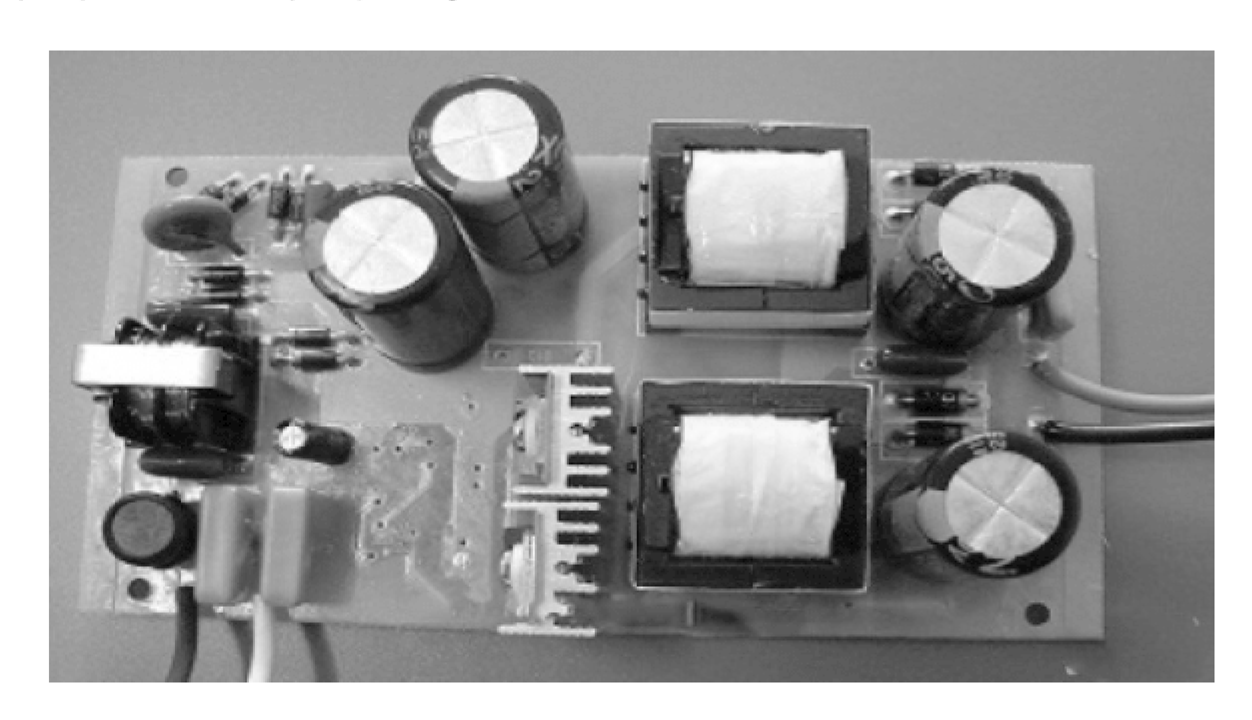


图 5-5　一种隔离式 LED 驱动电源

2）高压线性驱动电源

线性电源将输出电压的取样与参考电压进行比较，比较器的输出信号反馈控制输出晶体管的基极，保持输出稳定的电压，原理如图 5-6 所示。近年开发出的 LED 高压线性驱动电源不需要变压器，220V AC 输入整流器后直接与 LED 器件、高压线性驱动 IC 连接。具有电路简单、无电解电容、效率高、功率因数（PF）高、EMI 小、成本低等优势，特别是可以和 LED 光源板一体化制成光电组件，大大简化了 LED 灯具的制作工艺，降低了成本，是一种应用前景非常好的电源技术。但是，现有方案的输入电压范围较小、有频闪。图 5-7 为一种单段高压线性驱动电源的原理图，核心为集成电源 IC CYT1000C，该电路可以提供最大 12W 的输出功率，最大输出电流 60mA，工作电压高达约 250V。图 5-8 所示是一种使用高压线性驱动电源的 50W 工矿灯光电模组照片，图中央位置为整流桥堆，220V AC 直接输入整流器，周边的 5 个集成电路为单段高压线性驱动 IC，所有的光源为 36V 高压 LED 器件。

控制器的机理是利用传感器（如光感、红外、超声、声感等）感应的信号自动控制 LED 灯具的亮暗、开关等动作，也可通过蓝牙、WiFi 等通信协议和单片机人为控制灯具或灯

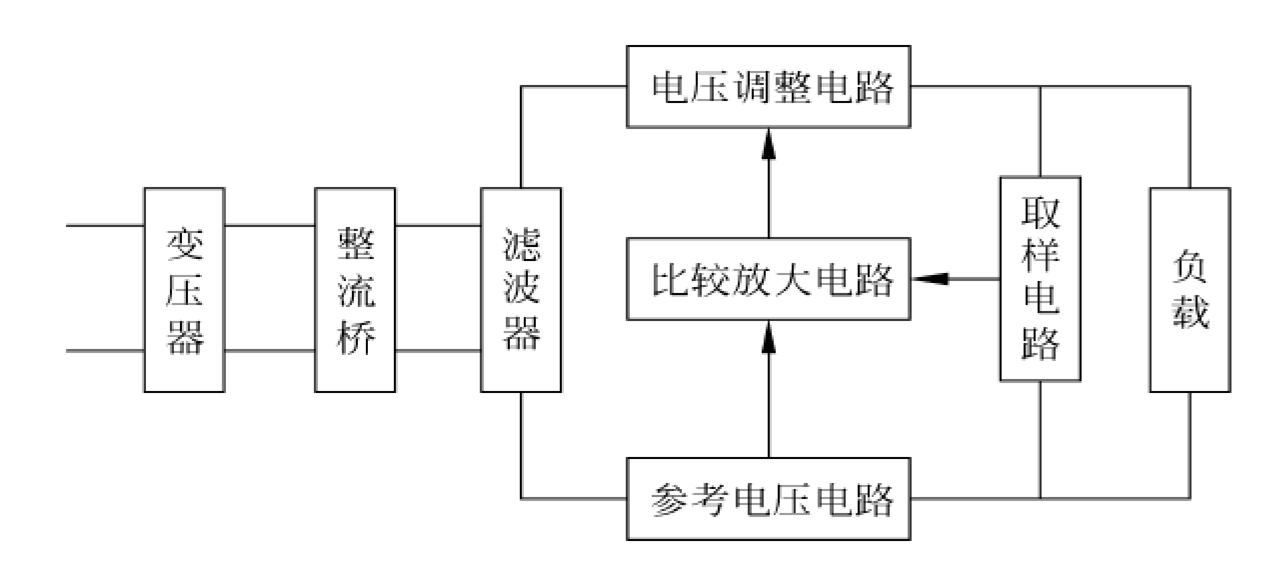


图 5-6 线性驱动电源原理图

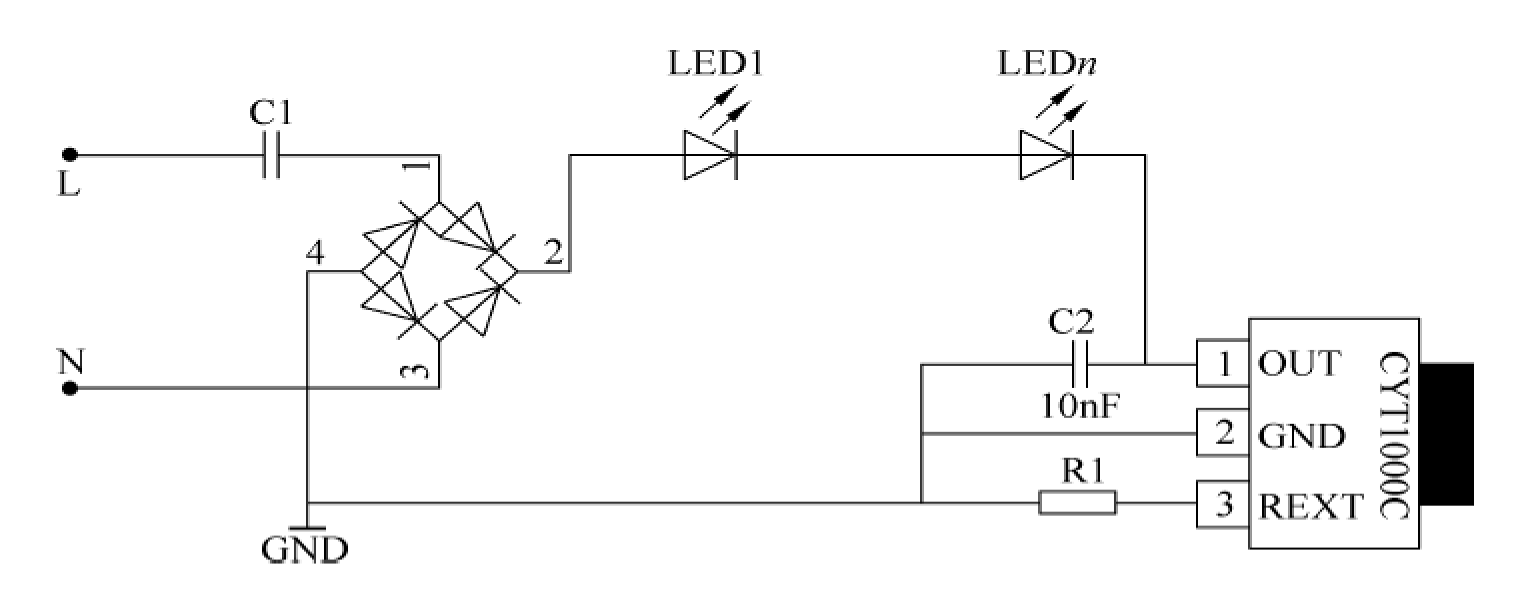


图 5-7 一种单段高压线性驱动电源的原理图

具组的亮暗、开关、色温、颜色等动作。一般将控制器模块安装在驱动电源板上。

3. PCB 灯板

LED 灯具中 PCB 灯板具有固定光源、实现电气连接、热传导等作用。小体积、高功率密度的半导体照明灯具常用的 PCB 灯板为铝基板，如球泡灯、射灯、筒灯、路灯等，如图 5-9 所示。在 LED 分布较散、低功率密度的半导体照明灯具中也使用普通的 FR-4 型 PCB 灯板等。



图 5-8 使用高压线性驱动电源的 50W 工矿灯光电模组



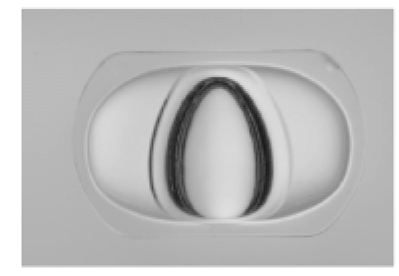
图 5-9 一种球泡灯 PCB 灯板(铝基板)

4. LED 光源

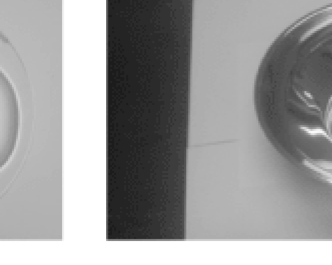
灯具中 LED 光源的作用是发出满足应用需求的可见光，与电源一起决定了 LED 灯具的光效。均采用贴片式 LED 器件，高压驱动方案多采用小功率 LED，低压驱动方案多采用大功率 LED，也可采用 COB 集成封装 LED 等。

5. 光学系统

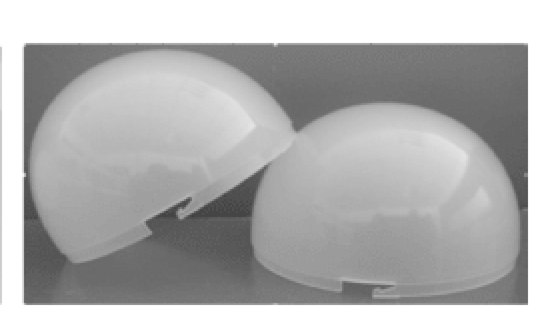
光学系统的作用为通过光学设计实现半导体照明灯具不同的出光效果，从而满足不同照明领域的需求，设计中利用了光的反射、折射、透射及漫反射等性质。光学系统主要包括透镜、反射器、混光器等光学元器件。透镜利用了光线的折射原理，主要用于小角度照明产品，其结构较为复杂、效率较低；反射器利用了光线的反射原理，主要用于大角度照明产品，其结构较简单、效率高、配光以轴对称性为主，但是配光的控制较难；混光器利用了光线的漫反射、漫透射原理，主要用于减少灯具的眩光、多色混光，可以获得柔和、均匀的出光面。常用的光学系统如图 5-10 所示。



(a) 透镜



(b) 反射镜



(c) 球泡灯灯罩(混光器)

图 5-10 常用的 LED 灯具光学器件

6. 导热界面材料

由前述可知，LED 灯具由光源、灯壳等多个部分连接而成，LED 器件焊接在 PCB 板上，PCB 板压接或插接在散热器上，散热器再压接在灯壳上。由于各个器件、组件表面的粗糙不平，在其结合部将存在许多空隙，而空气的热导率很低，将会大幅增大界面的热阻，严重影响灯具的散热效率。导热界面材料是指用于填充空气缝隙的具有较高热导率的胶状体、弹性体，主要包括导热膏类、导热弹性垫片材料类、相变材料类等。

导热膏是在有机硅氧烷中添加陶瓷等粉粒复合成为膏状物，具有良好的导热、绝缘、减震的性能，同时无毒无味、耐腐蚀，可在－50℃～＋250℃内正常工作，热导率可达 0.3～8W/(m·K)。使用时直接将其涂覆在相关材料表面后将另一面材料压紧固定即可。

导热弹性垫片材料是指在硅橡胶中掺入陶瓷粉粒等高导热材料并压制成膜，使用时将该膜置于两个导热体中间并压紧固定。表 5-1 为国外标准导热硅橡胶薄膜主要供应商及产品型号、性能。

相变材料是一种储能材料，它会在相变过程中吸收或放出相变潜热，一般的相变温度为 40～80℃，当界面温度达到相变温度时，相变材料发生相变，表现为材料变软、体积膨胀 15%～20%；在压紧的条件下，相变材料会充分覆盖、填充界面间的缝隙，同时有效地排出空气，降低热阻。一般将相变材料加工成膜后使用。表 5-2 为国外相变材料主要

产品型号、性能。

表 5-1　国外标准导热硅橡胶薄膜主要供应商及典型产品型号、性能

公　司	牌　号	导热率/W/(m·K)	填料	硬度 ShoreA	厚度/mm	热阻/(K/W)	工作温度/℃
Kunze	Ku-CG20	1.9	陶瓷	90	0.2	0.22	−60～200
Stokwell	TC3001	1.6	陶瓷	50		1.2	
Hala	TGF-Mo500S1	2.5	陶瓷	50	0.15	0.38	−60～180
高柏	H48-2	2.2	陶瓷	10	0.1～2		−40～200
Thermagon	Tgard210	5.0	BN	80	0.25		−60～200
Chomerics	HCS570	1.5		25	0.5～5.0	1.4	−55～200
Dowcoming	TP1502	1.1		47			

表 5-2　国外相变材料薄膜主要产品型号、性能

型　号	导热率/W/(m·K)	相变温度/℃	工作温度/℃	相变材料	载体	相变体积变化/%
KU-CR	0.47	60	−60～150	CRAYTHERH		15～20
KU-CRF	3.0	51	−60～150	CRAYTHERH/石墨		15～20
KU-PCO	5.1	48	−60～200	硅胶		
KU-CRFI	3.0	51	−60～150	CRAYTHERH		15～20
KU-PX	3.0	45	−60～150	CRAYTHERH		15～20
KU-ALC	220	60	−60～150	CRAYTHERH(双面涂)	铝	
KU-ALF	220	51	−60～150	CRAYTHERH(双面涂)/石墨	铝	

5.2　典型 LED 灯具

按照上述定义，LED 灯具是将照明模组与驱动电源或是照明光源与灯具外壳、灯罩、电气连接器组合为一体的具有完善的光、电、色、热、机械性能，整体可以互换的独立照明光源。按照应用可分为室内 LED 照明灯具和室外 LED 照明灯具，按照电源安装位置可以分为内置一体式 LED 照明灯具和外挂电源 LED 照明灯具。下面介绍几种典型的 LED 灯具。

5.2.1　LED 射灯

射灯主要是用于装饰、商业空间照明以及建筑装饰照明等领域，随着 LED 技术的发展，以 LED 为发光体的射灯（LED 射灯）呈现优异的性能，具有光效高、光束可精确控制调整、色温及颜色可调可控等优点。

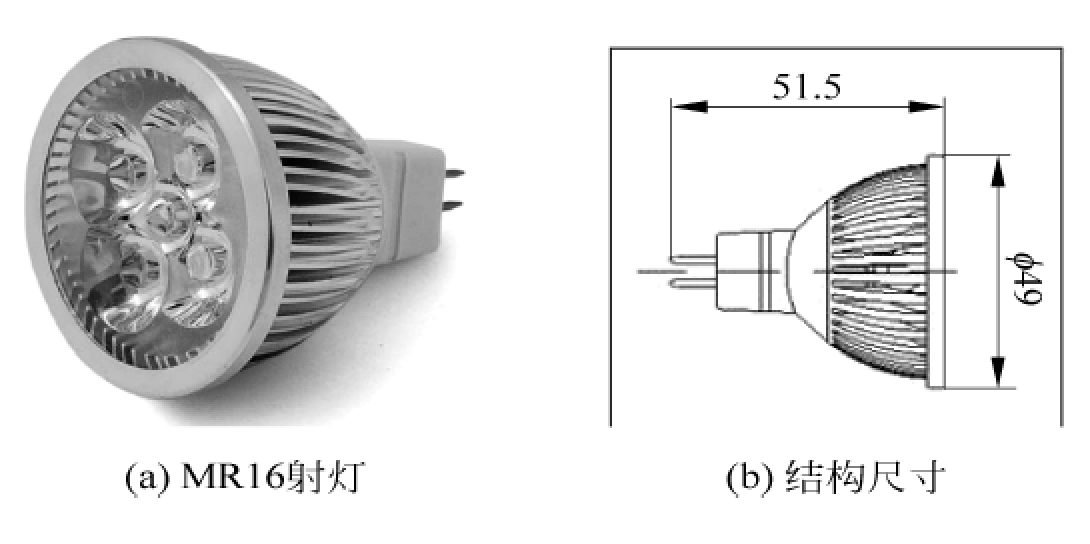
按照应用可分为下照式和路轨式，按照电气接口可分为插脚式(MR11、MR16、MR25为主)、螺口式(以E26、E27为主)等类型。下面以最常用的MR16为例讨论射灯的设计。

MR(mutiface reflect)意为多面反射式灯杯射灯，其后的数字表示灯杯口径(单位：1/8英寸)，MR16为灯杯口径2英寸(16×1/8英寸=2英寸≈50mm)，其外观结构及照片见图5-11。主要指标如下：

(1) 电功率：1～5W；

(2) 输入电压：12V AC；

(3) 光束角：25°、35°、45°。



(a) MR16射灯　　(b) 结构尺寸

图5-11　MR16射灯

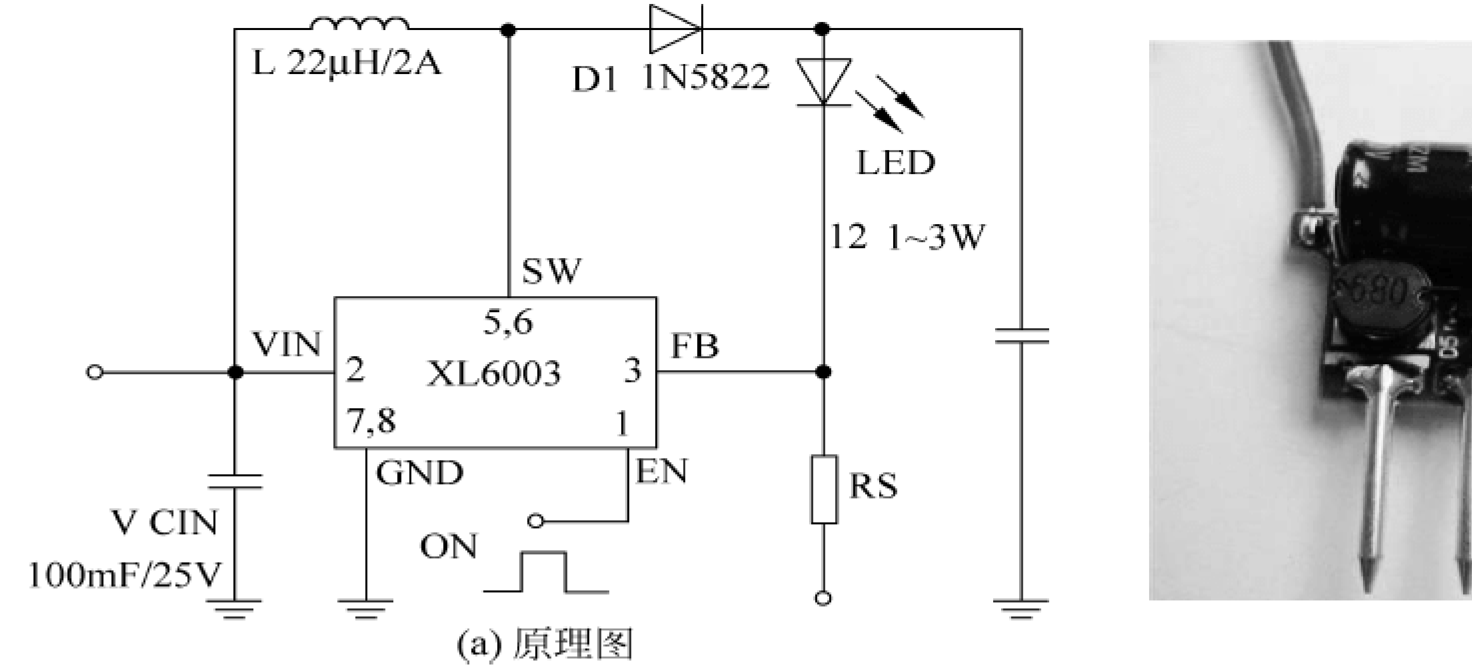
主要技术要求如下：

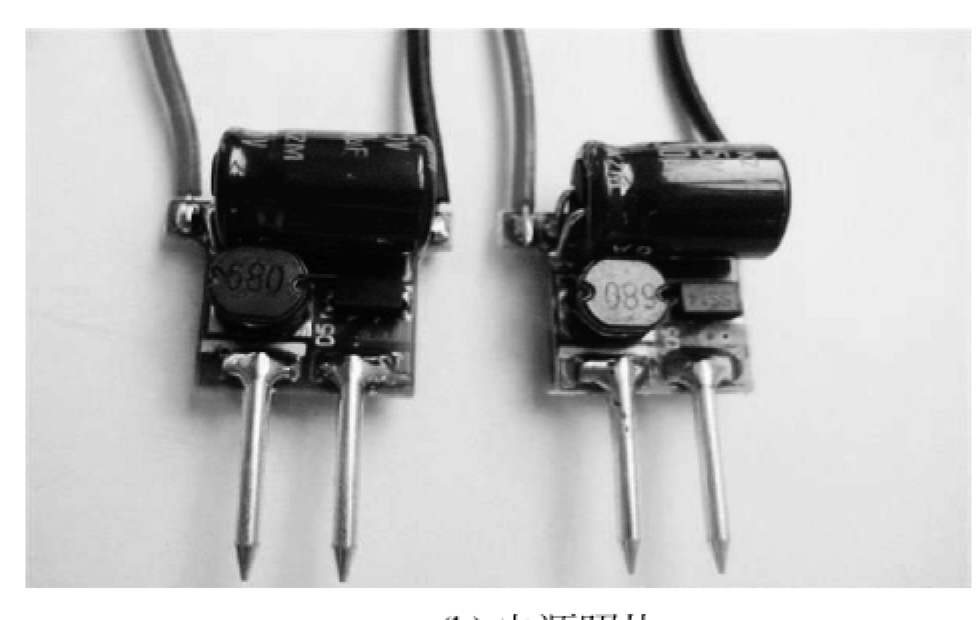
(1) LED尽量扩展为面光源，减少眩光；

(2) 光效100lm/W以上，色温可选、显色指数80以上；

(3) 无频闪、高可靠。

由上述要求可知，MR16射灯是一种体积非常紧凑的内置电源的LED灯具。可选降压模式、内置过温保护功能、可PWM调光、低封装热阻的驱动IC作为驱动电源，如PT4115，采用SOT89-5封装结构，其热阻为45K/W，电路见图5-12。





(a) 原理图　　(b) 电源照片

图5-12　一种适合于MR16射灯的驱动电源

该电源置于MR16灯杯的尾部，照明模组可为集成式或单灯式，通过引线或连接器与电源线路连接，如图5-13所示。



(a) 集成式



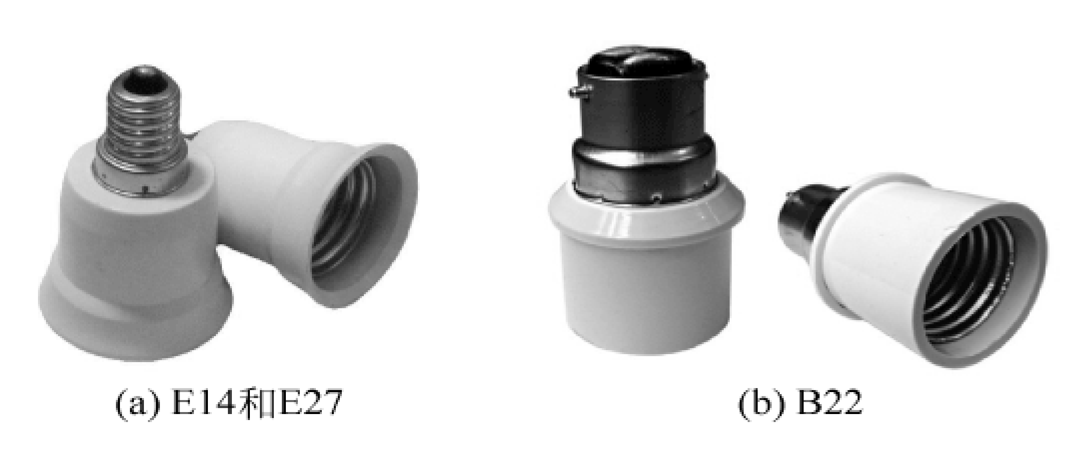
(b) 单灯式

图 5-13　MR16 射灯照明模组

5.2.2　LED 球泡灯

LED 球泡灯广泛应用于城市亮化工程，字牌广告、城市步行街、酒店宾馆表面装饰轮廓、门面灯光效果装饰、迪厅、酒吧灯光艺术照明，特别适合室内豪华型高标准大空间效果装饰，如珠宝照明、舞台照明、展览展示艺术厅环境照明、橱柜照明、广告装饰照明、居家别墅装饰照明等，营造气氛效果，是目前取代传统卤素灯的理想选择，是 21 世纪最佳绿色照明产品。

按照电气接口可分为螺口式(E26、E27、E14 等)和插口式(B22 等)，如图 5-14 所示。E 表示(Edison，爱迪生)螺口灯头，其后的数字指螺口螺纹牙顶的直径，单位为 mm，欧洲和中国的规格标准为 E27，美洲的规格标准为 E26，E14 常用于小口径的蜡烛灯。B 表示插口灯头，其后的数字指插口灯头的直径。图 5-15 所示为装入灯壳内的一种球泡灯组件和灯泡。



(a) E14和E27　　(b) B22

图 5-14　常用球泡灯灯头结构示意图





图 5-15　装入灯壳内的一种球泡灯光电组件和灯泡

基于 LED 单向性的发光原理，设计人员在灯具结构上做了更改，使得 LED 球泡灯的配光曲线基本与白炽灯的点光源性趋同，以 7W 球泡灯为例，主要技术指标如下：

（1）输入电压范围：90V AC～240V AC(50～60Hz)；

（2）功率：7W；

（3）灯头：E27；

（4）光通量：600lm；

（5）标称色温：2700K；

（6）显色指数：>80；

（7）发光角：>170°。

出口产品的指标应该满足所在地的技术标准，如出口北美的球泡灯，其色温应该满足当地标准色温要求，根据 ANS IC78.377—2008 标准要求，色温需在如下八种中选一，并且必须达到表中所示精度，见表 5-3 ANS IC78.377—2008 标准的色温要求。

表 5-3　ANS IC78.377—2008 标准的色温要求

标称色温	目标色温 K	目标 Duv
2700K	2725±145	0.000±0.006
3000K	3045± 175	0.000±0.006
3500K	3465± 245	0.000±0.006
4000K	3985± 275	0.001±0.006
4500K	4503±243	0.001±0.006
5000K	5028±283	0.002±0.006
5700K	5665±355	0.002±0.006
6500K	6530±510	0.003±0.006
可通融的 CCT (2700～6500K)	$T^1 \pm \Delta T^2$	$DUV^3 \pm 0.006$

备注：

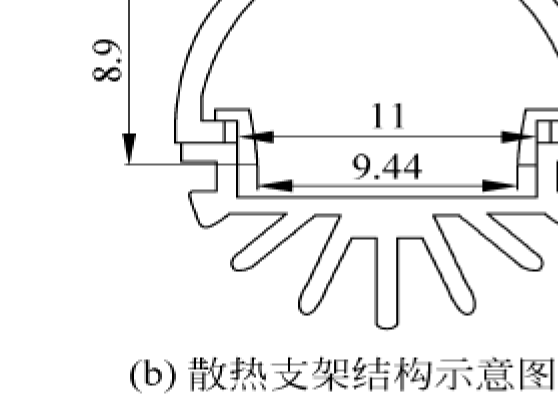
1. T 被选择为除了上表中前 8 个标称 CCT 值外，还可为以 100K 为步长的值(2800K，2900K，…，6400K)；
2. ΔT 由 $\Delta T = 0.000\,010\,8 \times T^2 + 0.0262 \times T + 8$ 给定；
3. Duv 由 $\mathrm{Duv} = 57\,700 \times (I/T)^2 - 44.6 \times (I/T) + 0.0085$ 给定。

5.2.3 LED 灯管

传统的灯管也叫荧光灯、日光灯，长玻璃圆管构成灯的主体，两端各有一对电极，灯内充有低压汞蒸气和少量惰性气体，玻璃管内壁涂覆紫外激发荧光粉，在工业、商业、家庭等应用广泛。日光灯尺寸和功率已经标准化(IEC81—1984)，按照直径可分为 T5、T6、T8、T12，如最常用的 T8 表示该类荧光灯灯管直径为 8×1/8 英寸(1/8 英寸＝3.175mm)。LED 灯管延续了 IEC81—1984 的尺寸标准，但是内部结构完全不同于传统灯管。图 5-16 给出了几种常用的 LED 灯管结构，(a)为具有散热支架＋透明外壳型，(b)为(a)的散热支架结构示意图，(c)为平板型散热支架＋弥散外壳型，(d)为平板型散热支架＋透明外壳型。



(a) 散热支架型+透明外壳



(b) 散热支架结构示意图



(c) 平板型散热支架+弥散外壳型

(d) 平板型散热支架+透明外壳型

图 5-16　几种常用的 LED 灯管结构照片

驱动电源可以采用与光源板分离的形式，如图 5-17 所示。现在的发展趋势为采用高压线性驱动电源的光电一体式的光源板，如图 5-18 所示。

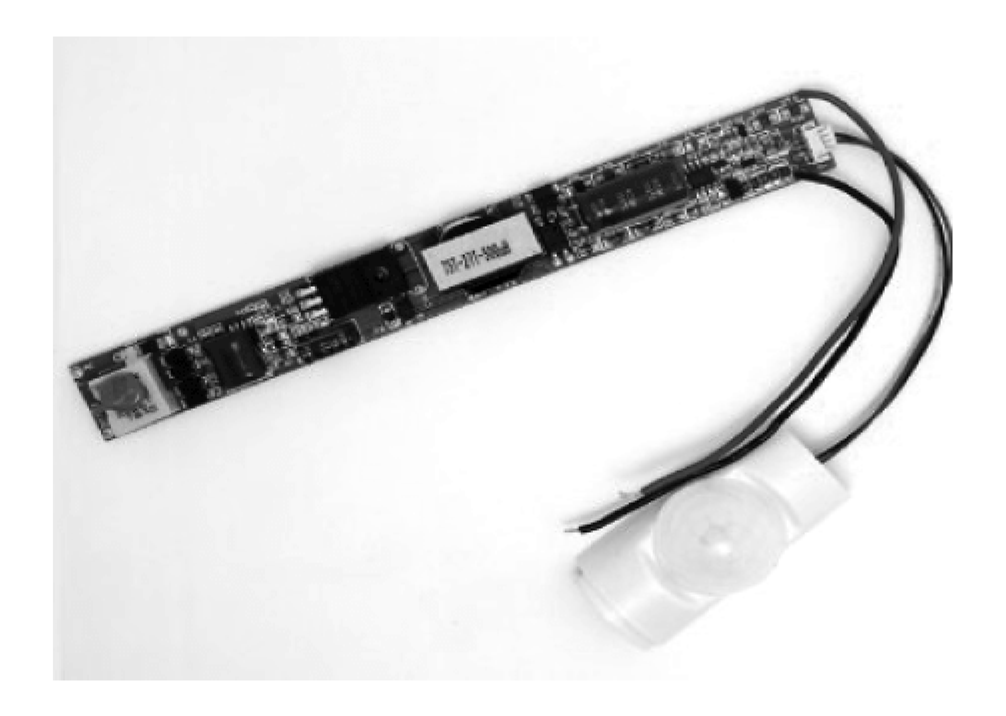


图 5-17　一种用于 LED 灯管的开关电源板

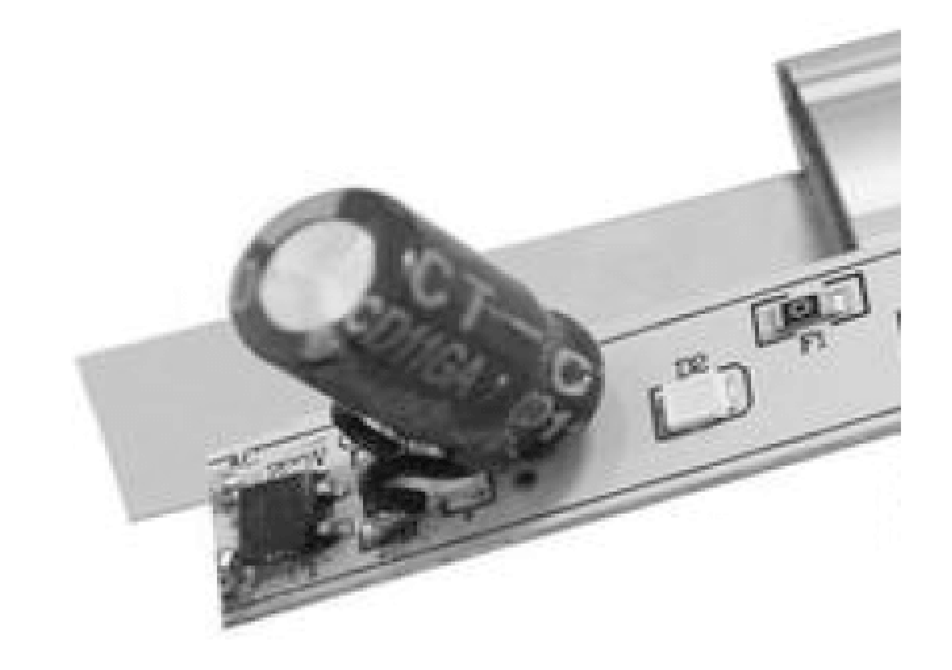


图 5-18　高压线性驱动电源的光电一体式的光源板

5.2.4　LED 筒灯

LED 筒灯是一种嵌入到天花板内、光线下射式的照明灯具，属于定向式照明灯具，即仅在其对面受光；光线较集中，具有明暗对比强烈的照明效果，可以突出被照物体，输出光通量较高，可衬托出安静的环境气氛。

按尺寸大小划分，常用筒灯有大中小尺寸三类。小尺寸包括 2.5 寸（开孔 ϕ80）、3 寸（开孔 ϕ90）；中尺寸为 4 寸（开孔 ϕ120），大尺寸包括 5 寸（开孔 ϕ150）、6 寸（开孔 ϕ160），厚度均小于传统筒灯的尺寸，不做限制。

按所用 LED 分类，可分为大功率 LED 光源和集成 LED 光源二种。常用的大功率

LED 器件多为 1W、2W、3W 封装，集成器件采用 COB 封装，芯片可以为正装，也可以采用倒装。一般整灯功率为 3～12W。图 5-19 为一种 LED 筒灯的结构散件。

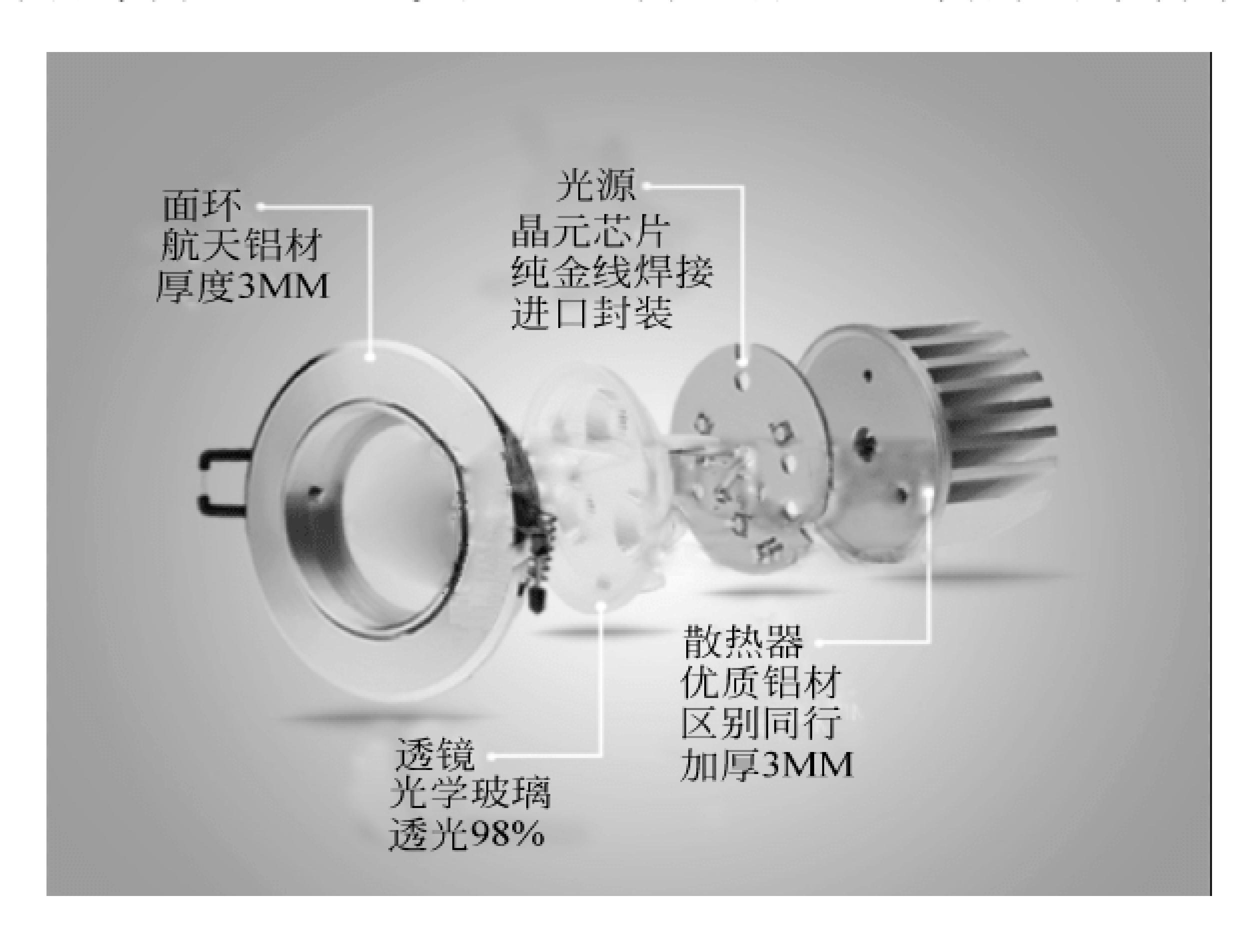


图 5-19 一种 LED 筒灯的结构散件

5.2.5 LED 路灯

与室内照明灯具不同，LED 路灯的工作环境恶劣，其性能好坏直接影响着夜间行车的安全。因此，在 LED 路灯的设计中，光学上要满足国家标准《CJJ45—2006 城市道路照明设计标准》，安全上还有满足《GB7000.1—2001 灯具一般安全要求与试验》、《GB7000.5—2005 道路与街路照明灯具的安全要求》、《IEC62031 普通照明用 LED 模组的安全要求》等标准，对防护等级(ingress protection，IP)也有明确要求，IP 防护等级是由两个数字组成，第 1 个数字表示电器防尘、防止外物侵入的等级，第 2 个数字表示电器防湿气、防水侵入的密闭程度，数字越大表示其防护等级越高。为了确保 LED 路灯的节能减耗，关于能效标准的研究工作正在快速进行，如深圳市于 2012 年在国内率先推出《LED 道路照明产品技术规范和能效指南》，为今后能效标准的制定打下了良好的基础。

为了增加无故障工作时间、确保长寿命，LED 路灯的热管理非常重要。为了加强散热，灯壳与散热器铸为一体，材料为铝合金，一盏 120W 的路灯散热器的重量往往高达十几千克以上，组装完成后的重量更高，这对在诸如台风等恶劣天气下的安全使用十分不利。图 5-20 所示为一种 LED 路灯的套件，驱动电源装在灯壳电源盒内，二次配光透镜装在 LED 光源板的每只 LED 器件上，LED 光源板安装在散热器底部，路灯灯壳与散热器和电源盒集成为一体。随着 LED 光效的不断提高及驱动电源技术的进步，路灯散热器的设计和制作水平越来越高，图 5-21 所示为一款采用高压线性驱动电源的分布式 LED 路灯，该路灯采用了 4 个 30W 的光电一体化光源组件，图中央为采用倒装 LED 芯片的 COB 集成光源，光源四周为驱动电源，右侧为交流输入及整流桥。此种结构不必再在散热器管壳上预留电源盒空间，利用了对流的“烟道效应”，减小了散热器体积和重量，整灯重量仅为 5 千克左右，室温下 LED 的结温可以不高于 80℃。



图 5-20　一种 LED 路灯的套件



图 5-21　分布式 LED 路灯为光电一体化光源组件

5.3　LED 灯具热设计基础

LED 灯具热设计是 LED 灯具光学设计、电路设计、结构设计、可靠性设计和安全设计中的一部分，一般归纳到可靠性设计中。

5.3.1　LED 灯具设计简述

1. 光学设计

与传统电光源相比，LED 芯片的尺寸小、配光比较容易。但是，单个 LED 芯片的输

出光功率远远达不到照明光源的要求，必须将多个 LED 芯片输出的光通量在特定方向上累加以满足照明的要求。所以 LED 灯具光学设计不仅仅是考虑输出光通量和光型满足使用要求，还必须考虑如何保证多个光源芯片制出的 LED 灯具的光色空间均匀一致。光学设计基本过程如下。

1）确定使用需求

包括 LED 灯具使用的场所、待照明物体的状况、所需的亮度、光色要求、成本要求等因素。照度和光色要求应根据国际和国家相关标准，如《GB50034—2013 建筑照明设计标准》、《GB/T50033—2013 建筑采光设计标准》、《CJJ45—2006 城市道路照明设计标准》等。GB50034—2013 是在对我国现有建筑照明情况实测考察的基础上，参照对比国际照明委员会(CIE)和部分先进发达国家的相关标准，对原有标准进行了大幅修正，对包括居住建筑、公共建筑、工业建筑、公共场所等 13 个常用场所规定了照明设计标准和能耗标准，成为我国照明设计的基本依据与大纲。表 5-4～表 5-6 分别列举了居住建筑照明、图书馆建筑照明和办公室照明的标准。

表 5-4　居住建筑照明标准

房间或场所		参考平面及其高度	照度标准值(lx)	Ra
起居室	一般活动	0.75m 水平面	100	80
	书写、阅读	0.75m 水平面	300	80
卧室	一般活动	0.75m 水平面	75	80
	床头、阅读	0.75m 水平面	150	80
餐厅		0.75m 水平面	150	80
厨房	一般活动	0.75m 水平面	100	80
	操作台	台面	150	80
卫生间		0.75m 水平面	100	80

表 5-5　图书馆建筑照明标准

房间或场所	参考平面及高度	照度标准值(lx)	UGR	Ra
一般阅读室	0.75m 水平面	300	19	80
国家、省市级及其他重要图书馆的阅读室	0.75m 水平面	500	19	80
老年阅读室	0.75m 水平面	500	19	80
珍善本、舆图阅读室	0.75m 水平面	500	19	80
陈列室、目录厅(室)、出纳厅	0.75m 水平面	300	19	80
书库	0.75m 水平面	50	—	80
工作间	0.75m 水平面	300	19	80

表 5-6　办公室建筑照明标准

房间及场所	参考平面及高度	照度标准值(lx)	UGR	Ra
普通办公室	0.75m 水平面	300	19	80
高档办公室	0.75m 水平面	500	19	80
会议室	0.75m 水平面	300	19	80
接待室、前台	0.75m 水平面	300	—	80

续表

房间及场所	参考平面及高度	照度标准值(lx)	UGR	Ra
营业厅	0.75m 水平面	300	22	80
设计室	实际工作面	500	19	80
文件整理、复印、发行室	0.75m 水平面	300	—	80
资料、档案室	0.75m 水平面	200	—	80

2）确定 LED 芯片

确定了应用的亮度要求后，即可进行 LED 芯片或器件的选择，依据为生产厂家提供的 LED 器件参数表的相关数据，如光强、色温、显色指数、光束角等。需要特别注意的是要对上述参数的误差(bin code)提出明确的要求；当然，参数格子划分的越细 LED 器件的成本越高。所以，应注意要求的合理性。参数格子内的参数误差必须依靠光学设计解决，如采用适当的混光距离、光扩散板等方法匀化处理。

3）光学设计

所谓 LED 灯具光学设计就是根据 LED 光源的特性设计特定的透镜、反射器、混光器等光学元件，改变 LED 光源光线的输出，最终达到国家相关标准和用户需求的照明要求的过程。包括 LED 封装中的光学设计(一次光学设计)和灯具的光学设计(二次光学设计)。其中，利用折射原理的透镜多用于小角度照明产品，可以设计出不同的配光产品，但其结构复杂、效率较低、成本较高。利用反射原理的光学反射器多用于大角度照明产品，效率高、成本低，但其配光仅能与光轴对称、光型控制较困难。混光器利用了光的漫反射、漫折射原理，可以使得 LED 灯具出光面均匀、减少眩光、改善光色均匀性和多色混光，对于目前流行的蓝光 LED＋黄色荧光粉白光光源的黄色色圈、RGB-LED 白光光源的色斑、LED 电极键合金丝遮挡暗斑等 LED 灯具的光色缺陷具有很好的改良作用，但也同时降低了灯具光学效率(简称灯具效率)。灯具效率是指从灯具输出的总光通量与灯具未加任何光学系统时 LED 输出的总光通量之比。任何光学元件都具有一定的光学损耗，在达到光型要求的前提下尽量减少光学元件的数量对提高灯具效率是有利的。

2. 电路设计

与传统的电光源不同，LED 为工作电压和工作电流均很小的单向导电型光源，与市电(220V AC)不匹配，必须配备专用的驱动电源。由于 LED 的微分串联电阻很小，而且随着温度的升高 LED 的工作电压降低，如果使用普通的恒压源驱动则极易造成 LED 的过流驱动直至永久性的损坏。因此，LED 的驱动电源必须是恒流源。

目前，常用的 LED 照明驱动电源包括开关电源、高压线性电源，此外，小功率的 LED 灯具也有使用电容降压直接驱动电源的方式。驱动电源种类选择的依据是灯具的主要性能、LED 器件的种类、电路拓扑结构、数量和成本。例如，最终的灯具为智能调光型，所使用的 LED 为大功率型，使用较少的数量就可满足输出光通量的要求，此时一般选用开关型驱动电路更为方便；若数量众多的小功率 LED 串联使用，则使用高压线性驱动电路更为简单、经济，但特别需要注意的是灯具外壳需要采用电绝缘材料才能满足安全性要求。

驱动电路设计的主要指标包括如下两项。

1）电源效率

电源效率是指电源输出功率（用于驱动LED的电功率）与输入功率之比，一般的驱动电源的电源效率应高于90%。由于LED灯具的总发光效率为LED器件发光效率（光效）、灯具效率和电源效率之积，所以提高电源效率与LED芯片、封装工艺中提高光效的意义一样重要。

2）功率因数

功率因数（power factor，PF）是指交流电压与电流间相位差的余弦，数值上等于有功功率和视在功率之比。视在功率表示输入电压与输入电流的乘积，它等于有功功率与无功功率之和。

例题5-1

一10W的LED球泡灯采用开关电源驱动，电源的输出电压为30V、电流350mA，使用电表测得此时的输入电压为220V AC、电流为55mA、有功功率为11.5W（电费按此值收）。求该电源的功率因数和电源效率。

解 视在功率为：220×0.055W=12.1W

功率因数为：11.5/12.1=0.95

电源输出功率为：30×0.35W=10.5W

电源效率为：10.5/11.5=0.913，即91.3%

功率因数是电力系统的一个重要的技术数据，它是衡量电气设备效率高低的一个参数。PF值小表明系统用于交变磁场转换的无功功率大，造成设备损耗大、线路供电损失大、电网不稳定、谐波污染等问题。目前，行业规定5W以上LED灯具的PF应达到70%以上，5W以下尚未做明确要求，但是，国家电力有关部门正在制定相关的国家标准。

3）电磁兼容（EMC）性能

LED电源工作过程中产生的谐波污染将产生电磁干扰（EMI），过强的EMI将会影响线路以及其他系统的正常工作，因此必须对EMI进行抑制和控制。LED光源模组和灯具产品也必须进行相关的EMC性能测试。EMC性能测试依据为相关的国家标准和国际标准，如CISPR15/EN55015/GB17743、CISPR22、IEC61547—1995及《GB/T18595—2001一般照明设备电磁兼容技术要求》，对不同功率的照明灯具分类管理，明确规定了30MHz以下（传导）和30～300MHz（辐射）各个频段的谐波功率的要求。

4）电源寿命

LED的优点之一是寿命长，为使LED灯具同样长寿命，驱动电源的寿命也必须长久。一般电源的寿命由电解电容器、光电耦合器等元器件的寿命决定。正弦交变电流将引起电解电容器中电解液的温升，而工作温度每升高10℃，电解电容器的寿命下降一半倍。因此，在热设计中必须关注驱动电源，特别是电解电容的散热。使用高压线型驱动电源可以去除电解电容器，有利于电源寿命的提高，但是，目前尚未完全解决由此产生的频闪现象。

3. 可靠性设计

可靠性是指产品在规定的时间内及给定的条件下完成规定功能的能力，分为固有可

靠性、使用可靠性和环境适应性。衡量可靠性的指标一般包括可靠度、无故障率、失效率等。可靠性设计是可靠性工程的重要组成部分，是实现产品固有可靠性要求的最关键的环节，是在可靠性分析的基础上通过制定和贯彻可靠性设计准则来实现的。在产品研制过程中，常用的可靠性设计原则和方法有：元器件选择和控制、热设计、简化设计、降额设计、冗余和容错设计、环境防护设计、人为因素设计等。除了元器件选择和控制、热设计主要用于电子产品的可靠性设计外，其余的设计原则及方法均适用于电子产品和机械产品的可靠性设计。

传统电光源（如白炽灯）寿命终了的主要原因是钨丝蒸发、细化直至断裂，而 LED 寿命终了的主要原因则为随着工作时间的延长发光材料逐渐老化产生的光衰。以常用的蓝光 LED＋黄色荧光粉构成的白光光源为例，老化可能发生在 LED 芯片、荧光粉、封装的胶体等，其中以封装中的透明胶体受光和热的作用产生的老化为光衰的最主要原因。为使寿命期的光衰保持在期望值以下，就必须将输出光通量和工作温度控制在所用光学胶体材料的允许范围内。由于 LED 灯具所需的光通量为事先确定的参数，因此，LED 灯具的可靠性设计基本上就是控制 LED 结温的散热设计。

除了上述的结温控制设计外，为了确保 LED 灯具的寿命，还必须防止突发性的 LED “死灯”问题，产生该问题的主要原因有静电放电（ESD）和电气过载（EOS）。前者主要由于外部静电的影响，后者则是由于驱动电源中的浪涌、短路造成的电气负荷超出芯片的承载能力导致的 LED 芯片的永久性失效，该部分的预防设计放在驱动电源设计中。热设计将在本书中其他章节详细介绍，本节主要介绍静电防护方面的内容。

任何两种不同材质的物体接触后都会发生电荷的转移和积累，形成静电。人身上的静电主要是由衣物之间或衣物与身体之间的摩擦造成的。穿着不同材质的衣物时“带电”多少是不同的，比如化学纤维衣物容易产生静电，而棉制衣物产生的静电较少。此外，干燥的环境更有利于电荷的转移和积累，比如冬季人体静电可达几千伏甚至几万伏。

为了评价静电的影响及寻找防治对策，相关机构建立了人体放电模型（human body model，HBM），如图 5-22 所示。遵循的标准有 MIL-STD-833C METHOD 3015.7、EIA/JESD22-A1149（JEDEC，1997）。HBM 的 ESD 是指因走动或其他摩擦因素在人体上累积了静电，其静电电压可达数千伏甚至 3 万多伏，见表 5-7。当此人去碰触到 IC、LED 等器件时，人体上的静电便会经由器件管腿进入器件内部，再经由芯片放电至大地，如图 5-22 所示。该放电过程会在几百毫微秒（ns）内产生数安培的瞬间放电电流，如一般商用级 IC，2kV 的放电电压可产生的瞬间放电电流峰值约为 1.33A。在自动组装生产线中即使没有操作人员的静电影响，作业中的摩擦也会致使 LED 器件表面积累静电，这种放电的电荷量虽少，但是放电时间更短（放电电阻为 0），瞬态的放电电流更大。这就是所谓的机器模式（machine model，MM），这种模型对 LED 的损伤与否还在研究中，遵循的

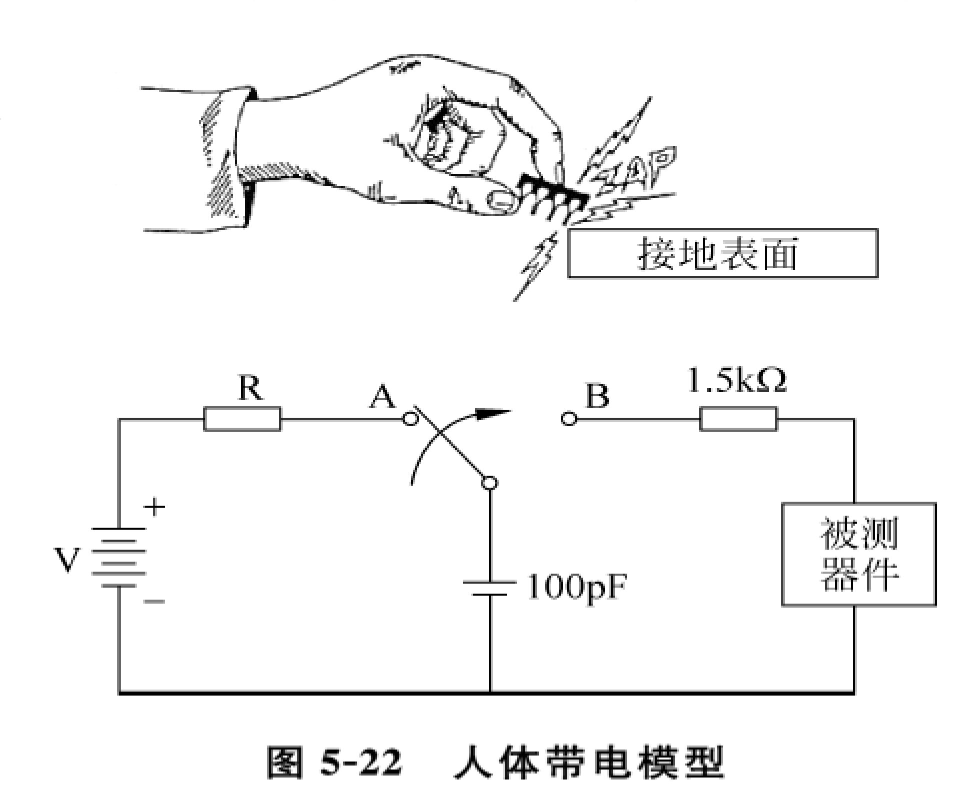


图 5-22　人体带电模型

标准有 EIAJ-IC-121 METHOD20、EIA/JESD22-A115-A(JEDEC,1997)、ESD STM5.2(EOS/ESD,1999)。此外,带静电器件的能量也能从一个带电器件迅速地释放给其他器件或部位,这就是所谓的带电器件模型(charged device model,CDM)。该模型假定当带电器件的导电管脚与具有较低电位的导体表面接触时会发生迅速放电,放电时间 2.0ns 以内,放电时电流却能达到几十安培的水平,遵循的标准为 ESD DS5.3.1。对于手工作业为主的生产线的静电防护主要使用 HBM 模型。

表 5-7 工艺线操作员人体静电程度

	相对湿度	
	10%~20%时	65%~90%时
地毯上行走	35.0kV	1.5kV
塑料材质地面行走	12.0kV	0.25kV
操作台附近的操作者	6.0kV	0.1kV

一般认为静电通过 LED 有源层产生的焦耳热致使部分半导体材料熔化是静电损伤的主要机理,静电为正向电压时即为此。若静电为反向电压,有源层中的线缺陷首先成为导电微细通路,高压导致的电子雪崩将使线缺陷连通,使通路局部温升并熔融该部分材料为导体。从 LED 的电流-电压曲线上看,该部分损伤就是将开启电压前的并联电阻降低。当然,高的静电电压也会作用于芯片电极、键合引线等之间,破坏绝缘层造成器件的永久失效,此时,一般能在显微镜下观察到明显的烧着痕迹。

为了表征半导体器件的耐静电能力,EIAJ(日本电子工业协会)建议在 HBM 条件下将器件耐压分为三级,第一级的耐压范围为 0~1999V,第二级为 2000~3999V,第三级为 4000~15 999V。

LED 的耐压值在 200~2000V,与所用衬底和器件结构有关。如使用蓝宝石衬底的蓝光 LED 的耐压值要小于碳化硅衬底的器件,原因在于蓝宝石是绝缘材料,易于积累静电;其次它的平面电极间的间距仅为 10μm 左右,更容易被高压击穿。

为使 LED 灯具具有优良的耐静电能力,不仅在工艺过程中要注意静电的防护,如工作环境的防静电处理,包括地面、工作台、座椅、工具、操作员等的接地处理,保证工作间的湿度不低于 50%等。此外,必须增加必要的防静电设计,如封装中或使用 LED 时在芯片两端并装保护二极管、在 LED 及与 LED 直接或间接相连的导体上涂覆防静电材料、LED 驱动电路的输入端增加过流保护器件等。

4. 安全性设计

安全性设计是指为保证产品在使用、储运、销售等过程中保障人体健康和人身、财产安全免受伤害或损失所采取的防护方法和措施。安全性设计的依据是国家的相关法规、规范及标准,如出口日本的产品应满足日本标准协会制定的 JISC8105-1 及-3、日本电灯协会制定的 JEL811:2005 等标准;出口美国的产品要通过 UL 认证;出口欧洲的产品要通过 CE 认证。此外,在欧、亚、非、澳四大洲的绝大多数国家和地区则遵照由国际电工委员会(International Electronal CommissionI,IEC)起草的防护标准 IEC 529-598 系列标准,我国灯饰行业的 GB7000 系列国家标准就对应于 IEC60598 标准。IEC(EN)按照防

电击、防尘防潮和可燃性三个环节对照明电器产品进行了等级标示。

1）防电击保护程度

（1）CLASS 0 级灯：无代表符号，电源电压为 50V 以上高压，单层绝缘结构，无接地；

（2）CLASS I 级灯：无代表符号，电源电压为 50V 以上高压，单层绝缘结构，外露可触金属需接地；

（3）CLASS II 级灯：用符号“II”表示，电源电压为 50V 以上高压，通常为双重绝缘结构，无接地；

（4）CLASS III 级灯：用符号“III”表示，供电为安全特低电压 SELV（外置变压器直插式灯具），电源电压为 50V 以下低压，单层绝缘结构，无接地。

2）防尘、防固体异物、防潮能力

防护等级标记为 IPXX（ingress protection，IP），第一位数表示防尘防固体异物指数，从 0～6 共七个等级，数字愈大防尘防固体异物能力愈强：0—无防护；1—防止大于 50mm 的固体异物进入灯具；2—防大于 12mm 的固体异物；3—防大于2.5mm 的固体异物；4—防大于 1mm 的固体异物；5—防灰尘；6—无灰尘进入。

第二位数：防潮能力指数，从 0～8 共九个等级，数字愈大防潮能力愈强：0—无防护；1—防滴（垂直）；2—防滴（倾斜 15°）；3—防淋水（60°范围）；4—防溅水；5—防喷水；6—防猛烈海浪；7—防浸水影响；8—防潜水影响。

3）安装面可燃性

（1）仅适宜于直接安装在非可燃表面的灯具，用符号“F”表示；

（2）适宜于安装在普通可燃表面的灯具，用符号“F”表示；

（3）可安装在普通可燃表面且隔热材料可能盖住灯具的场合（即嵌入式），用“F”表示。

对于不同用途和不同使用条件的灯具，安全性要求也不尽相同，比如，我国对于 LED 路灯制定了专门的国家安全标准《GB7000.5—2005 道路与街路照明灯具安全要求》，在灰尘和水的进入防护规定了 3 层防护等级，A 级品不应低于 IP67 要求，B 级品不应低于 IP66 要求，C 级品不应低于 IP65 要求。不同使用环境对照明灯具 IP 防护等级的要求见表 5-8。

表 5-8 常见环境对灯具 IP 防护等级的要求

应用环境	一般室内	厨房、浴室、卫生间	阳台、屋檐、雨棚、简易车库等类似环境	普通厂房	有粉尘产生的厂房等类似环境	广场、道路、隧道等露天室外境	地埋灯具	水下用灯具
最低 IP 等级	IP20（灯具上一般不标注）	IPX4	IP54	IP4X	IP5X	IP65	IP67	IP68

LED 灯具典型的不安全现象包括：

（1）外壳过热、冒烟、起火；

（2）掉落、散落；

（3）漏电、带电部位的外露；

(4) 高温部位的外露;

(5) 易造成伤害危险部位的外露。

为了防止上述不安全现象的发生,产品的安全设计必须充分考虑:

(1) 所选元器件的寿命期、过载能力,PCB电路板发热、电火花、浪涌,连线短路或短路引起的着火、冒烟;

(2) 易于辨识及无法装错、防止落下、模块化无伤害的灯具结构,若使用玻璃则应有保护装置防止破损或破损后的飞溅;

(3) 对于不使用工具即可拆开的外壳,拆开后的带电部位不应外露,从手指、镊子等工具可以插入的开口处无法接触到带电部位;

(4) 对于能引起烫伤部位应进行适当的保护、文字提示警告;

(5) 人体易于触摸部位不应存在凸起、锐角,若存在必须有防护措施。

此外,LED灯具还具有特殊的不安全现象——照明的生物安全。光的本质是一种电磁波,人体受到光能的照射并吸收了光能后将会产生各种反应。其中紫外光、蓝光等大能量光子对人眼有较大的损伤,对于LED照明,蓝光的损伤尤为重要,表5-9示出了光辐射对人眼伤害的情况。ICE-CIE共同审定了危险等级及划分的概念,IEC制定了IEC62471标准对LED产品的光辐射安全测试与评估进行了具体的要求,依此对LED照明产品进行了测试分析,实验结果表明类似LED手电筒类的小面积聚光型光源达到了RG-2危险级,其他光源均属于无危险级。

表5-9 光辐射对人眼伤害的情况

影　响		紫外(100～400nm)	可见与近红外(400～1400nm)	红外(>1400nm)
眼睛	角膜	光致结膜炎、光致角膜炎		烧伤、震动损伤
	晶状体	白内障、染色、硬化症	近红外白内障效应	红外白内障效应
	视网膜	视网膜变异	热损伤、震动损伤、日光视网膜炎、斑点恶化	

与传统的电光源不同,LED本身无毒无害是绿色环保光源,但是,在制作LED灯具的过程中也应注意对所使用的透镜、PCB板、散热器、电源等材料及生产工艺过程的物质进行环境负荷检查,使之满足环境保护相关的法律、法规的要求。

5. 结构设计

产品的结构设计是指产品开发过程中结构设计工程师根据产品功能而进行的外部与内部结构的设计工作,主要工作包括根据产品用途和主要功能设计外观总体结构(严格地讲该部分属于工业设计范畴),对总体结构分解并确定各个部件的固定方法、设计产品使用和功能的实现方式、产品各部分的使用材料和表面处理工艺等。产品结构设计是机械设计的基本内容之一,也是设计过程中花费时间最多的一个工作环节。在产品形成过程中,起着十分重要的作用。在结构设计中,设计者还应考虑外观典雅、使用性能优良、成本低、易于制造、便于装配、便于维修、方便运输、对环境无不良影响等。结构设计具有"全方位"和"多目标"的工作特点。

LED灯具的结构设计应在满足光学、电学、可靠性和安全性设计要求的前提下,并考

虑人体工学、美学设计的基本要求，将设计思想转化为现实实体（产品）的一个重要设计阶段。在完成该阶段的初样后，还要进行光学，特别是热学设计的效果验证，可以是计算机模拟，也可以是实体的测试验证，以使最终产品完全满足设计要求。

外观设计常用的平面设计软件有 Photoshop、CorelDRAW 等，常用结构设计软件包括 AutoCAD、Pro-E、CATIA、SolidWorks 等。

5.3.2 热设计目标和原则

由于 LED 芯片的热量最终由灯具传递到空气环境中，所以，灯具的热设计对于 LED 芯片性能的发挥、寿命的保障均有决定性意义。灯具热设计就是事前预估、评价 LED 灯具散热能力的一种手段，通过建立物理模型和设定不同的边界条件就可仿真、评估不同的散热设计方案，并据此优化方案。通过仿真优化设计达到以下热设计目标：

（1）确保 LED、驱动 IC 等有源器件在合适的热环境下工作，保障灯具的可靠性；

（2）有利于 LED 等有源器件尽量在大的电流下正常工作，提高单位价格下的输出光通量。

由前述可知，LED 灯具包括光源、驱动电源、散热器、光学元件等部分，所以，LED 灯具的热设计首先应与结构设计、电气设计、光学设计统筹兼顾、权衡分析，遇到矛盾综合分析折中解决。

热管理设计中应考虑的因素包括：灯具结构、尺寸、热功耗、成本、工作环境、可靠性等，具体热设计原则如下：

（1）严格遵循相应的国内外及行业热设计标准；

（2）热设计的前提应为通过合理的光学结构设计尽量提升灯具的光效，降低热功耗；

（3）按照可靠性要求，特别是关键元器件的可靠性要求，使之始终工作于正常的散热环境中；

（4）选择合适参数的元器件及安装位置、方式，确保其散热条件，保障工作可靠性；

（5）LED 灯具中谨慎采用有源散热方案，若必须使用有源散热方式（如风扇、热管），要综合考虑冷却部件系统的故障率可否满足系统寿命要求及维护的便利性；

（6）热设计中应留有裕量，充分考虑使用环境对灯具散热的影响，如室外使用的灯具将会受到沙尘的影响，风沙积灰将降低热辐射、对流的效率；

（7）在保证良好散热的前提下，必须考虑热设计与实现的成本，还要考虑维修、维护成本。

5.3.3 热设计流程

以光源与驱动电源分体结构的 LED 灯具为例讨论其热设计的基本流程如下：

（1）根据灯具总输出光通量、使用环境、条件和预期寿命确定 LED 芯片的结温；

（2）根据 LED 器件说明书确认并测试验证其光效，进行初步的灯具光学设计和电气设计（确定 LED 数量 $n \geqslant$ 灯具光通量/LED 器件光通量，要考虑灯具光损耗），确定灯具的热功耗 P_d；

(3) 根据公式 $T_J = T_A + P_d R_{ja}$，确定灯具等效热阻 R_{ja}；

(4) 根据 LED 器件说明书确认并测试验证其器件热阻；

(5) 根据 LED 灯具外观、结构重量、电气、光学等要求，设计出热沉灯壳初步结构；

(6) 根据灯壳初步结构及电气结构，确认主热通道及热传导层数目、热连接方式，估算出各层热传导热阻；

(7) 根据(2)、(3)、(4)计算出 LED 灯具热对流、热辐射的有效热阻，充分利用散热结构设计增大自然对流系数，若散热能力仍不够，则可考虑灯壳外部涂覆高辐射率的红外膜层；

(8) 根据使用环境模拟仿真散热器灯壳结构的散热能力，与(7)对比，多次优化结构设计后确定最终 LED 灯具结构；

(9) 制作 LED 灯具，实测灯具的平均 LED 结温、最高结温和热阻，评估并优化灯具热设计。

5.3.4 典型散热器材料与结构

LED 灯具散热器的作用就是将工作中 LED 芯片产生的热流量快速传导至表面并散发至空气中。所以，散热器散热能力的大小既有材料热导率的因素，更要考虑大的散热面积、有利于提高自然对流系数的外形及高的红外发射率等因素。一般情况下，散热器与灯具外壳一体化。所以，要求散热器材料热导率尽量高外，还应具有比重小、强度高、易加工、成本低、表面处理简单、易于制作等优点，使得散热器在具有强大散热能力的同时，重量最小、成本最低。常用灯具散热器材料包括金属、无机非金属、高分子材料三大类，典型结构为翅片式，常用散热器如下。

1. 铝翅片散热器

金属铝的热导率高、比热容大、比重小、价格低，是制造金属翅片式散热器的主要材料，制作工艺包括压铸铝和拉伸铝两种。压铸铝是目前最常用的一种，压铸铝的热导率可达 70～90W/(m·K)，可以压铸外形美观、形状多样的散热器，经简单的机械加工处理后即可使用。但是，压铸铝需要开发专门的模具，因此成本较高，不利于新品开发。拉伸铝是将棒状熟铝材直接拉伸成型，经简单的切割就可得到所要的散热器，其热导率高达 200W/(m·K)，精度高、重量轻。若要表面电绝缘，可以在其表面进行电化学处理，如阳极氧化处理或硬质阳极氧化处理，经特殊封孔后耐压可达近千伏。多用于路灯、隧道灯、工矿灯等大功率室外 LED 灯具。图 5-23 为一种 100W 功率的 LED 工矿灯散热器，铜热沉直接挤压在铝散热器上，LED 光源 PCB 板直接安装在铜热沉处，表面

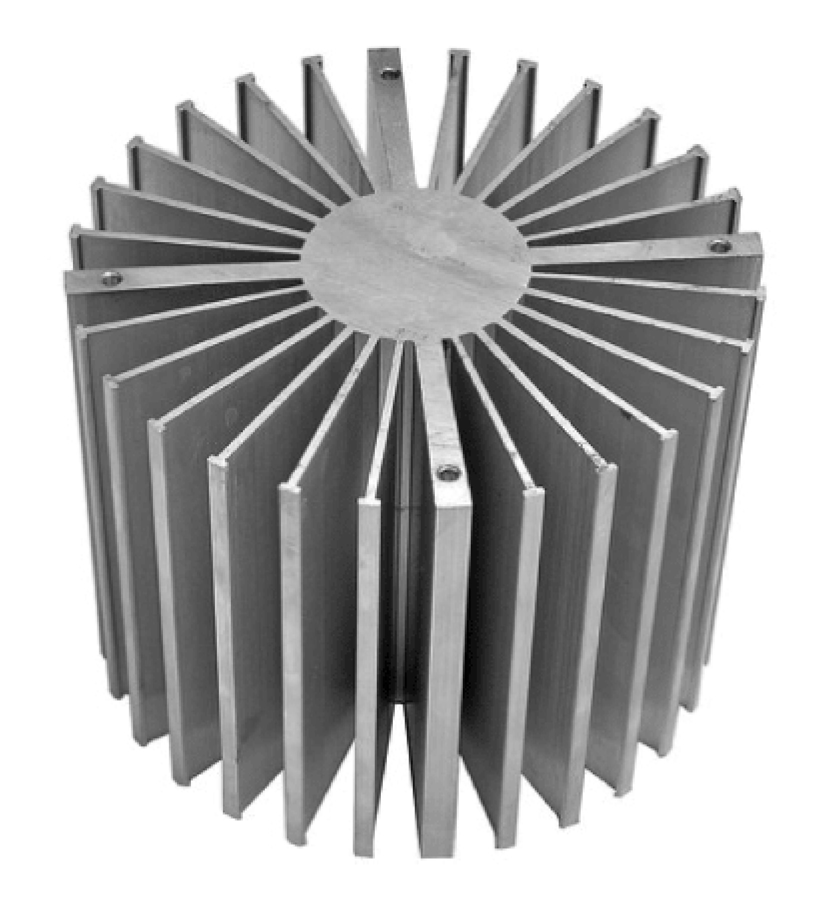


图 5-23　一种 LED 工矿灯散热器

进行了阳极氧化处理。

2. 导热塑料散热器

导热塑料是在常用的PP、ABS、PC、PPS等工程塑料颗粒基材中添加高导热率的陶瓷、石墨、金属等粉粒制出导热塑料模料，经注塑机模压出LED灯具散热器灯壳。如将PPS和40～325目的氧化镁粉粒混合压制出的导热塑料，其热导率为1～20W/(m·K)，为普通塑料的5～100倍，虽然过高的氧化镁粉粒的掺杂可以进一步提高热导率，但导致材料的成本过高、材料的模压特性也变差，散热器的成品率将下降。图5-24为一种导热塑料LED球泡灯散热器灯壳，可用于7W以下的LED球泡灯。为了进一步提高热导率、降低成本，可再掺杂金属粉粒、碳粉等。但是，散热器材料开始导电，需要从灯具整体重新评估安全性设计。

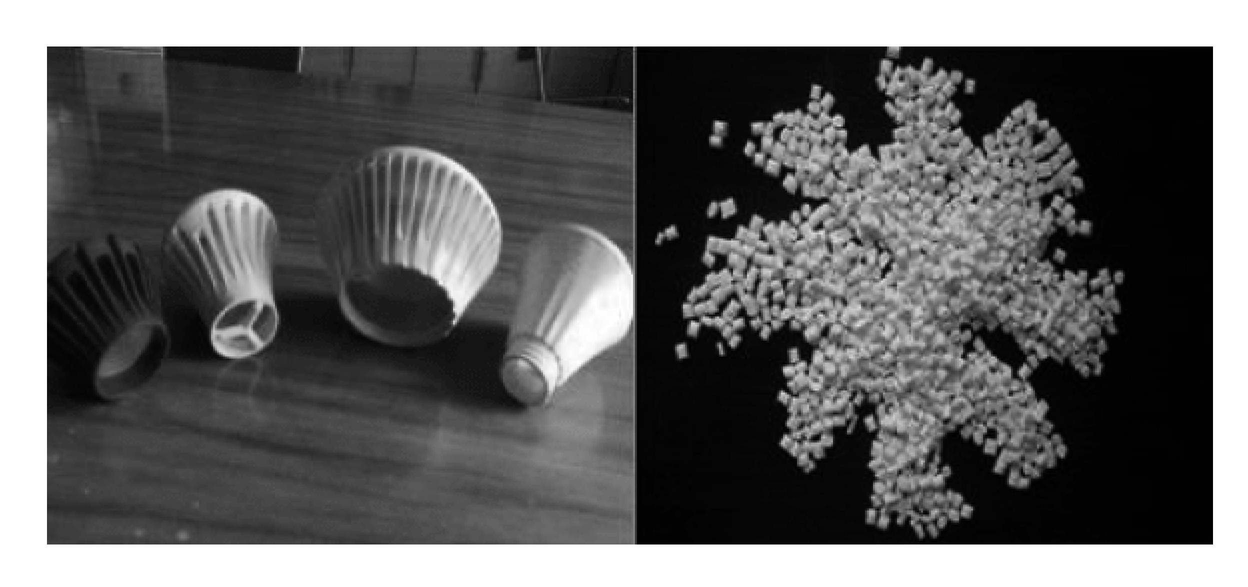


图5-24　一种导热塑料LED球泡灯散热器灯壳

3. 塑包铝散热器

计算表明若热源距离散热器表面小于5mm，只要材料热导率不低于5W/(m·K)，则该散热器的散热能力由热对流、热辐射决定，与材料的热导率无关。基于此开发的一种塑包铝散热器，即先冲压出铝支架，然后在其外部模压出一层数毫米的塑料散热层。LED光源PCB板安装在铝支架热沉处，经铝支架将光源热量快速传导至塑料散热层，而塑料的发射率远高于铝材，塑料散热层通过对流和辐射将热量传递至空气。一种塑包铝LED球泡灯灯壳如图5-25所示，可以用于8W的LED球泡灯。外包的塑料既可以是导热塑料，也可是普通塑料，外壳表面处理对热辐射影响较大，可以采用高辐射率的塑料或表面涂覆高辐射率的涂层。

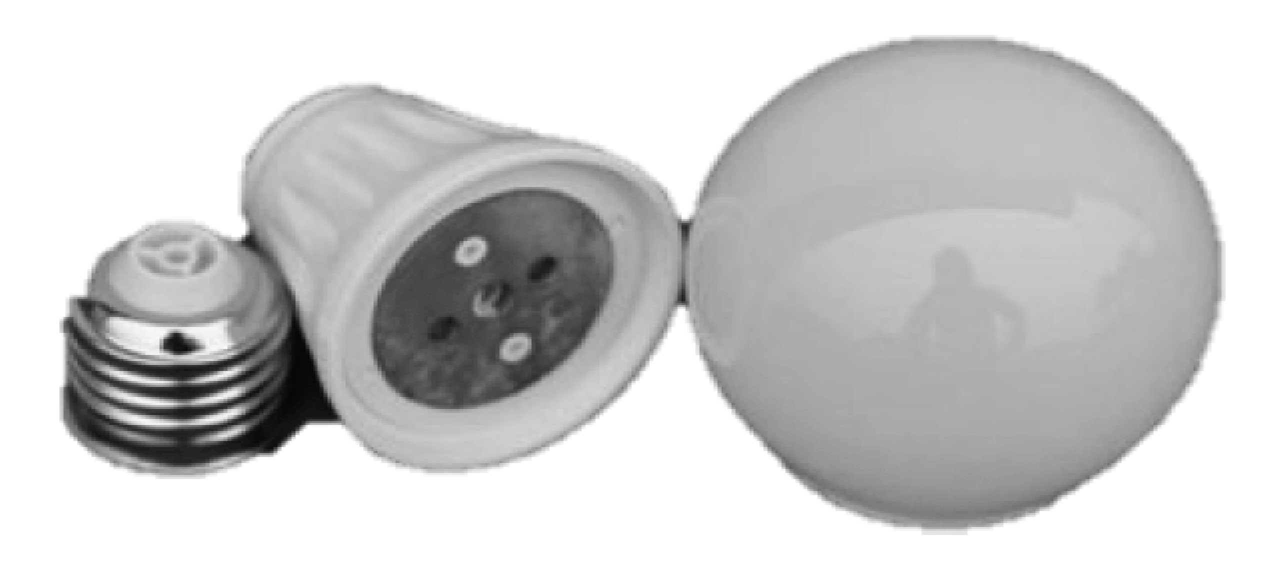


图5-25　一种塑包铝LED球泡灯灯壳

5.3.5 热沉热阻分析

分析图 5-26 所示热沉的热阻，假设热源温度为 T_1，热沉下表面温度为 T_2，环境温度为 T_a，设热沉周边四个面均隔热。如前所述，热源产生的热流传导至热沉底面，在底面通过对流和辐射将热量传递至空气中，其热阻包括三个部分：其一为传导热阻；其二为对流热阻；其三为辐射热阻。根据能量守恒定律，热平衡后，热源产生的热流量(热功率)应等于传导至热沉表面的热流量及通过对流、辐射将热量传递至空气中的热流量之和。根据公式，有

$$Q_s = \frac{T_1 - T_2}{R_{cd}} = \frac{T_2 - T_a}{R_{vd}} = \frac{T_1 - T_a}{R} \tag{5-1}$$

可得

$$R = R_{cd} + R_{vd} \tag{5-2}$$

式中，R 为散热器总热阻；R_{cd} 为散热器传导热阻；R_{vd} 为散热器的对流与辐射的等效总热阻：

$$R_{vd} = \frac{R_{cv} + R_{rd}}{R_{cv}R_{rd}} \tag{5-3}$$

式中 R_{cv} 和 R_{rd} 分别表示对流散热热阻、辐射散热热阻。

由上述分析可以得到散热器的热阻网络，如图 5-27 所示。

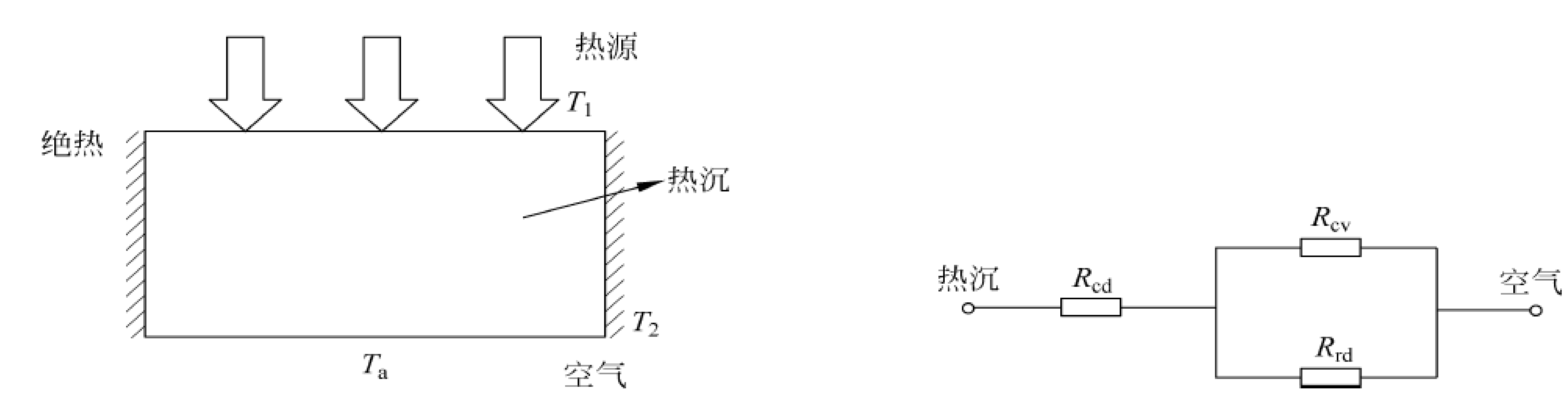


图 5-26 热沉的热模型

图 5-27 热沉的等效热阻网络

影响散热器总热阻的因素如下。

(1) 散热器自身参数的影响：散热器有效传导距离越短、有效散热面积越大，则散热器总热阻越小；材料热导率越大，总热阻也越小；

(2) 对流影响：对流系数越大、热交换有效面积越大，则散热器总热阻越小；

(3) 辐射影响：辐射率越高、热交换有效面积越大，则散热器总热阻越小；

(4) 热功率影响：同一散热器、相同散热条件下，热功率越大，则总热阻会减小。

5.4 LED 灯具热设计实例

5.4.1 使用翅片散热器的大功率 LED 路灯光源组件

翅片散热器是最常用的一种散热器，图 5-28 为一种使用翅片散热器的大功率 LED

路灯光源组件，在散热器上方均匀放置16颗功率为8W的LED芯片作为热源，模型参数如表5-10所示，芯片的最高温度近似为结温。利用SolidWorks 2012软件自带的流体分析插件Flow Simulation对该模型进行热仿真，分析散热器参数对其散热性能的影响。

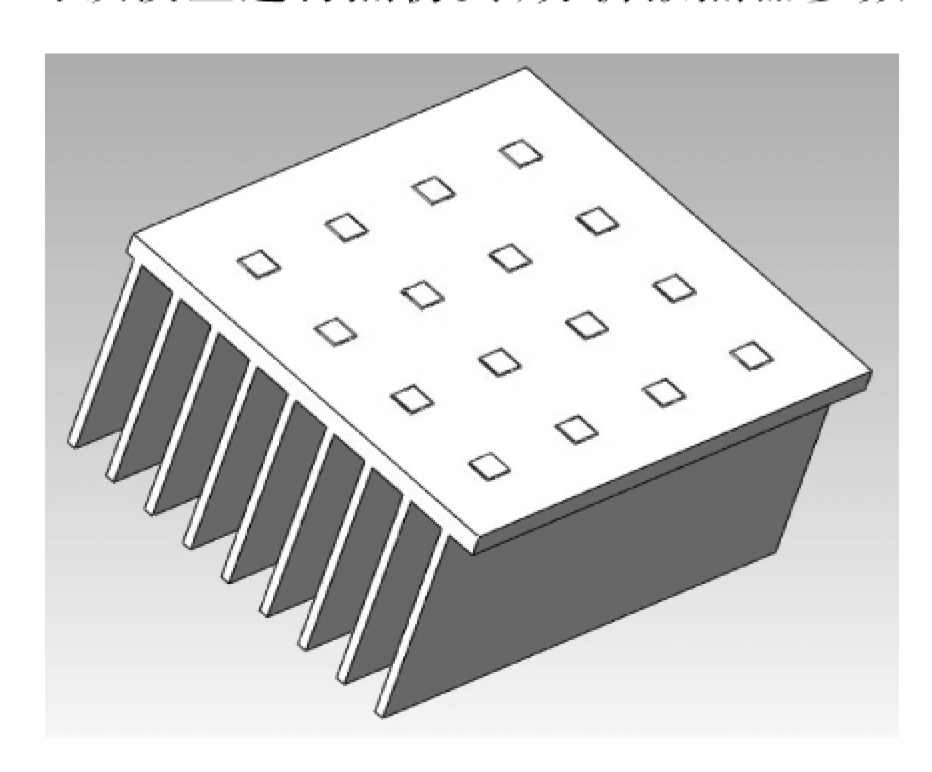


图5-28　使用翅片散热器的大功率LED灯具模型

表5-10　热源及散热器模型参数

芯片材料	芯片热导率/W/(m·K)	芯片尺寸/mm	散热器材料	散热器，热导率[①]/W/(m·K)	散热器尺寸/mm	接触热阻/(K/W)
GaN	130	5×5	6061铝合金	155	90×90	0.0002

注：①6061铝合金在室温下的热导率。

选择翅片高度、间距、厚度和翅片表面的热辐射系数作为变量，分别求出在其他三个参数恒定条件下，LED结温与变量的关系，从而找出最佳的散热器结构参数。

1. 翅片高度

首先，研究翅片高度对散热的影响。先将散热器翅片厚度设为2mm，间距设为12mm，数目设为9，表面热辐射系数设为0.7，只改变翅片高度，其他几何参数和边界条件都不变。依次设置翅片高度为30mm、40mm、50mm、60mm、70mm，模拟得到各个不同翅片高度下的散热器热场分布云图，求得LED结温与翅片高度的关系曲线，如图5-29所示。由图可知翅片高度越高结温越低，但当翅高超过50mm后其变化率减缓。

2. 翅片间距

将散热器翅片厚度设为2mm，高度设为50mm，表面热辐射系数设为0.7，改变翅片间距，需要注意的是因为软件模型中散热器的尺寸90×90(mm^2)是固定不变的，所以随着翅片间距的变化，散热器上的翅片数目会有所变化。同样的依次设置翅片间距为5mm、7mm、10mm、12mm、15mm，模拟得到各个不同翅片间距下的散热器热场分布云图，求得LED结温与翅片间距的关系曲线，如图5-30所示。由图可知翅片间距越大结温越低，但当翅距超过7mm后其变化率减缓，超过12mm后结温升高。原因为过小的翅距阻碍了对流空气的流动，降低了对流系数。超过12mm后的翅片数量减少，散热能力下降。

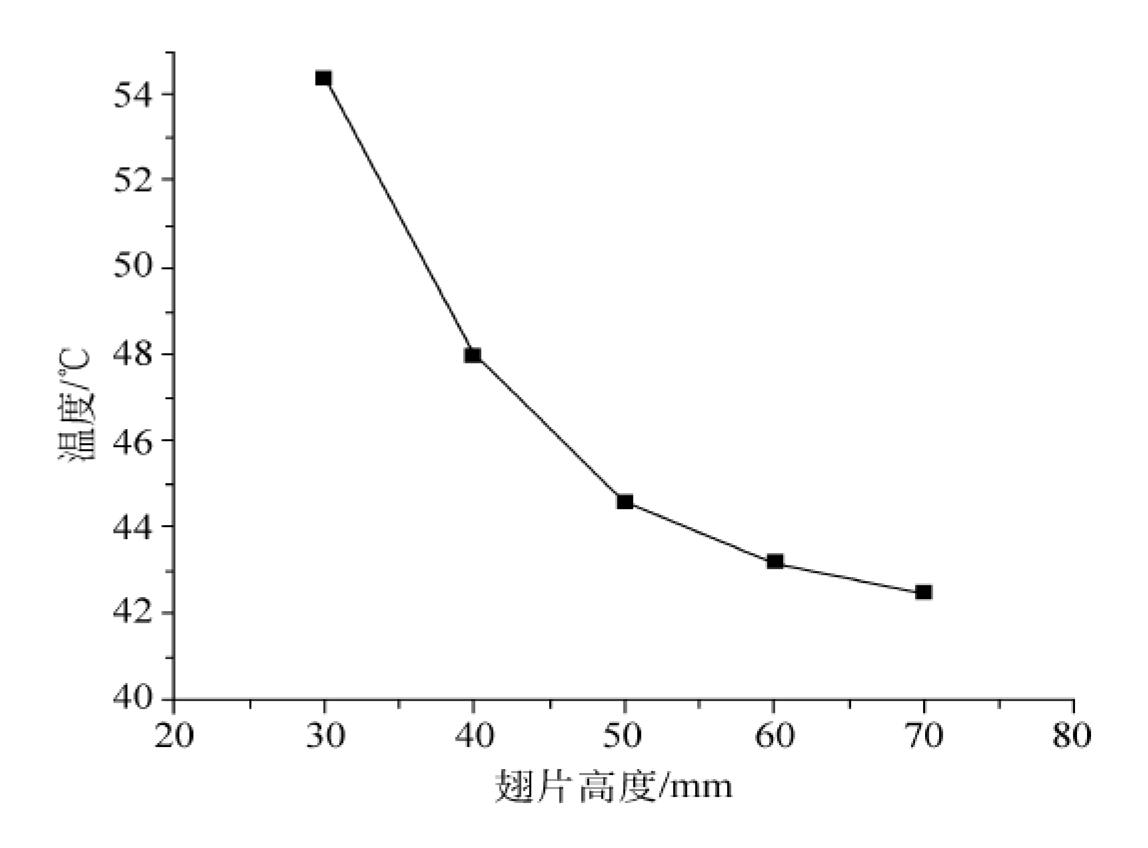


图 5-29 LED 结温与翅片高度的关系曲线

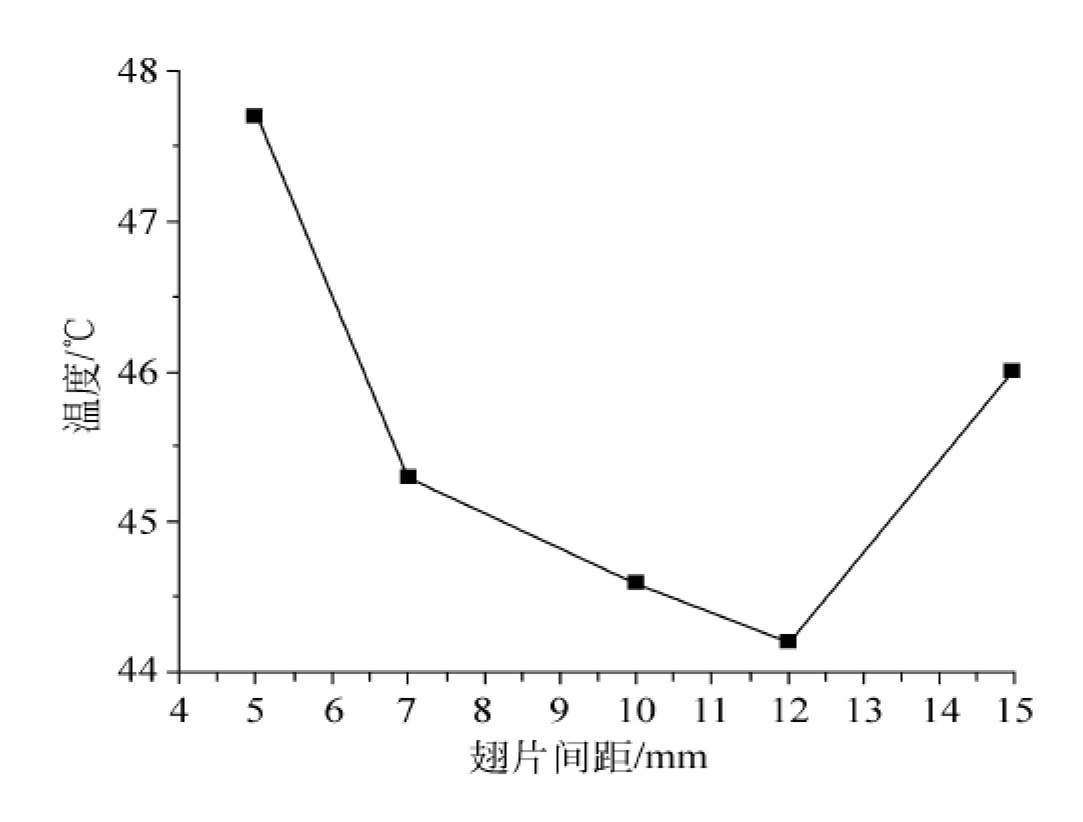


图 5-30 LED 结温与翅片间距的关系曲线

3. 翅片厚度

将散热器翅片间距设为 12mm，高度设为 50mm，数目设为 8 个，表面热辐射系数设为 0.7，改变翅片的厚度，其他的几何参数和边界条件都不变。依次设置翅片厚度为 2mm、3mm、4mm、5mm、6mm，模拟得到各个不同翅片厚度下的散热器热场分布云图，求得 LED 结温与翅片厚度的关系曲线，如图 5-31 所示。由图可知翅片厚度由薄变厚，结温逐步降低，当翅厚 4mm 时结温达到最低值，之后随翅厚增加结温快速升高。原因为过薄的翅厚增加了传导热阻，过厚则减少了翅片数量，即减少了散热有效面积。

4. 表面发射率

将散热器的翅片间距设为 12mm，高度设为 50mm，厚度设为 2mm，数目设为 8 个，其他的几何参数和边界条件都不变。依次改变发射率为 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9，模拟得到各个不同发射率下的散热器热场分布云图，求得 LED 结温与发射率的关系曲线，如图 5-32

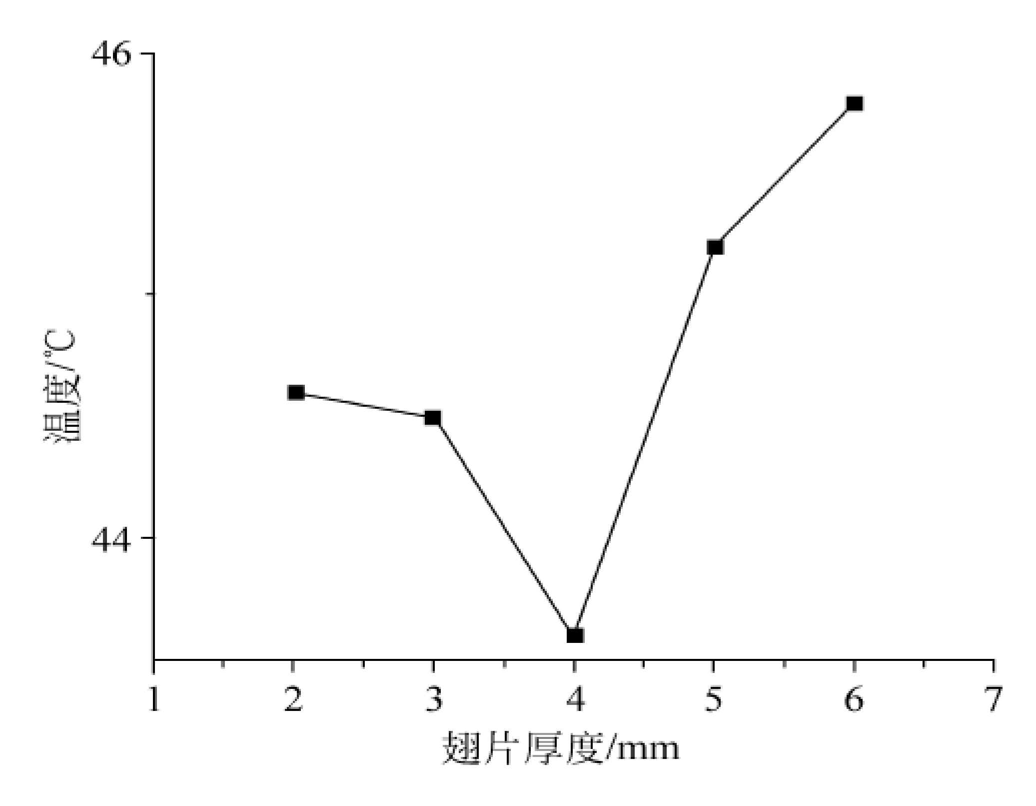


图 5-31　LED 结温与翅片厚度的关系曲线

所示。由图可知随着翅片表面发射率的升高，结温按照约 9％的比例线性降低。

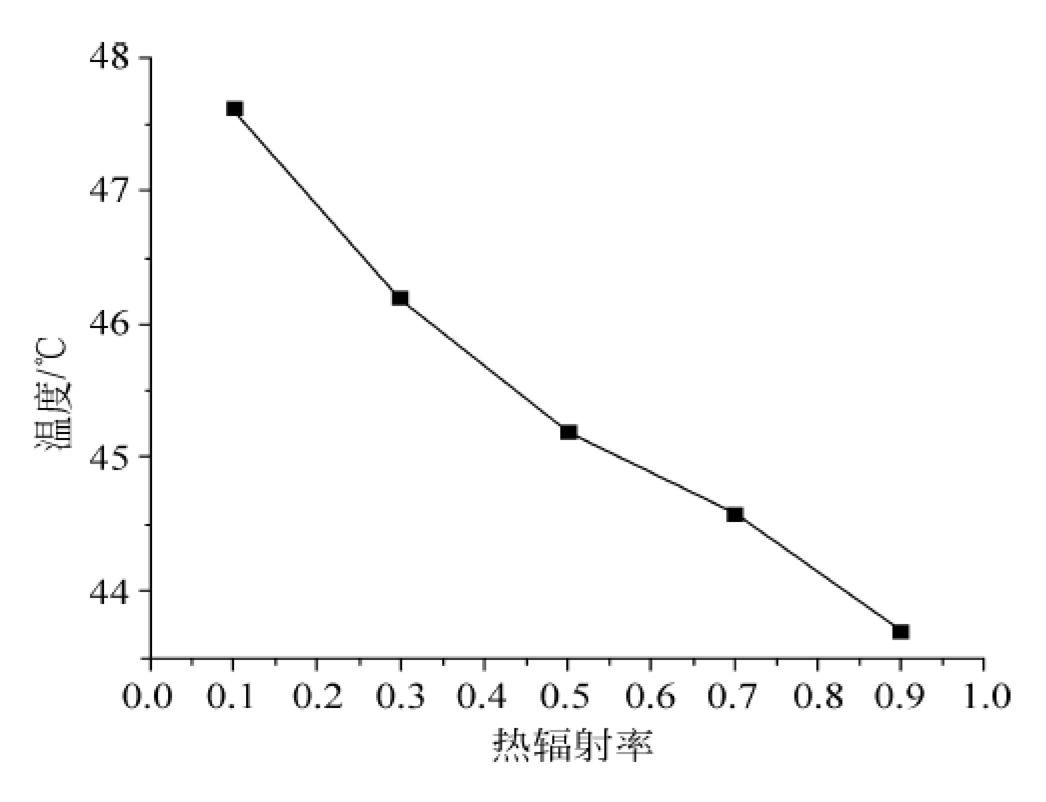


图 5-32　LED 结温与发射率的关系曲线

5.4.2　灯丝型 LED 球泡灯

灯丝型 LED 球泡灯是借鉴钨丝灯的整体外观设计实现的全角度 LED 照明光源，在钨丝球泡灯整体外观（包括灯头、球泡罩）保持不变的基础上，将发光的钨丝用 LED 制成的多根灯条来代替，并利用其原有的玻璃支架完成 LED 灯条的连接，再将灯条按照一定的空间位置均匀排布，进而使整灯基本上达到全角度照明的发光效果。该球泡灯由灯头、绝缘塑料外壳、球泡罩、玻璃支架、铜丝导线以及 LED 灯条（包括 LED 芯片、透明基板、硅胶与荧光粉的混合物）6 大部分组成。整灯及内部零件如图 5-33 所示。



图 5-33　灯丝型 LED 球泡灯结构示意图

1. 灯条及热设计

LED灯条结构如图5-34所示，使用透明环氧树脂将11只正装小功率LED芯片（功率为0.06W（3V×20mA））贴装在透明基板上，然后在基板四周涂满黄色荧光粉胶体。透明基板两端引出正负电极，基板即作为LED支撑及热沉，又作为四面发光的类灯丝体。

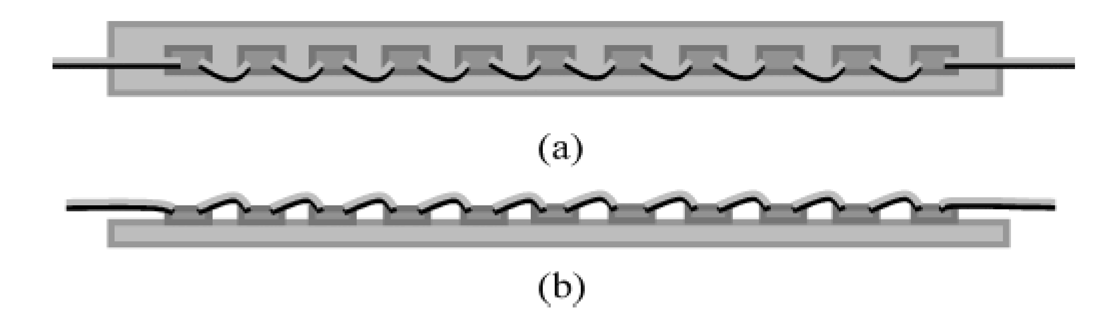


图5-34 LED灯条结构示意图

分别选用蓝宝石、石英和普通玻璃作为基板，其主要参数如表5-11所示。采用Ansys Workbench软件对其进行了热学仿真，图5-35为网格划分的局部图。边界条件如下：

（1）每颗LED芯片施加0.042W的热功率，每只灯条的热功率为0.462W；

（2）室温、无风条件下，灯条基板背面的温度分别为蓝宝石基板58℃、石英玻璃基板82℃、普通玻璃基板180℃。

表5-11 灯条模型所用参数表

材料层	长/mm	宽/mm	厚/mm	热导/W/(m·K)
蓝宝石衬底（芯片）	0.65	0.4	0.1	25
硅胶层	0.65	0.4	0.01	1.2

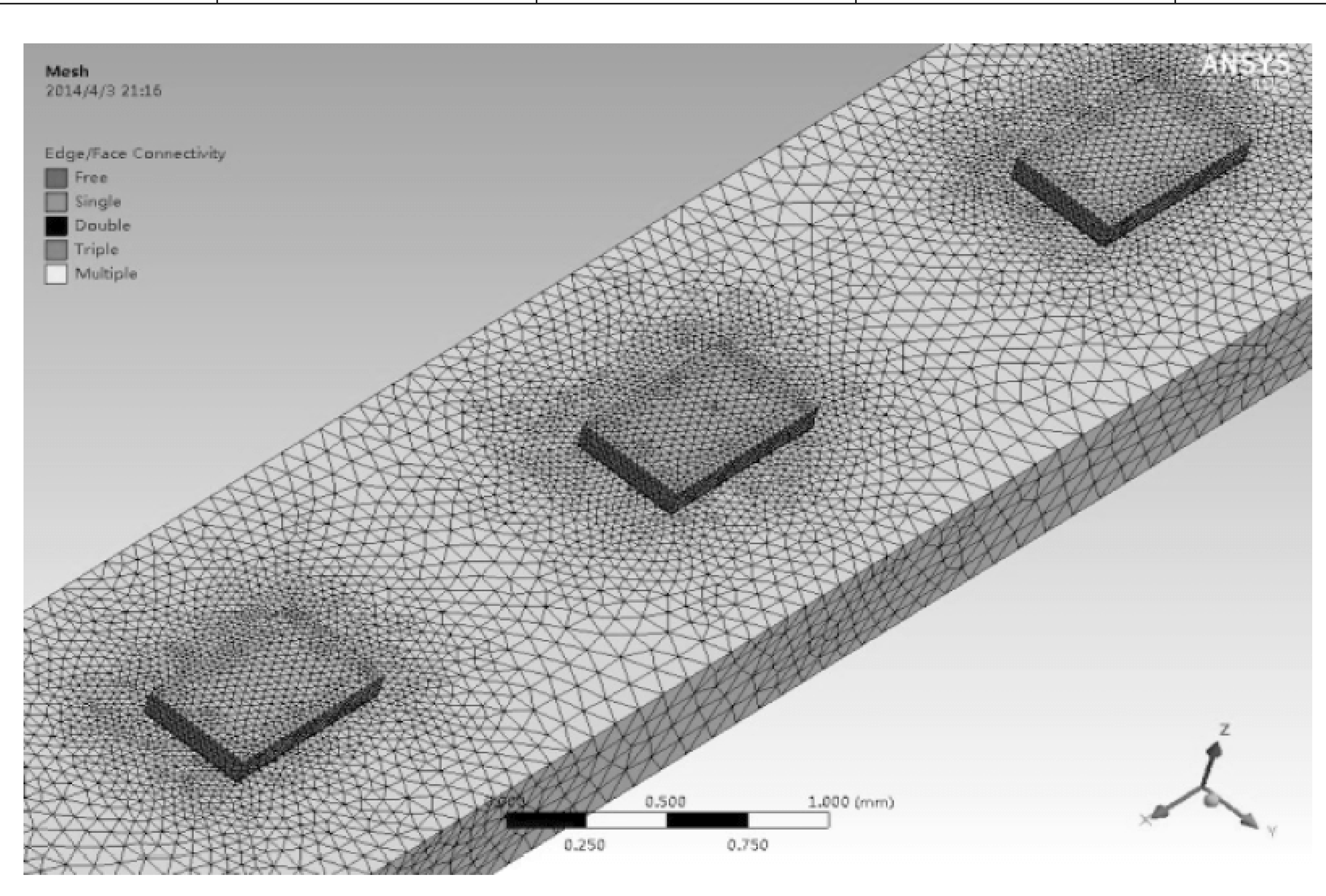


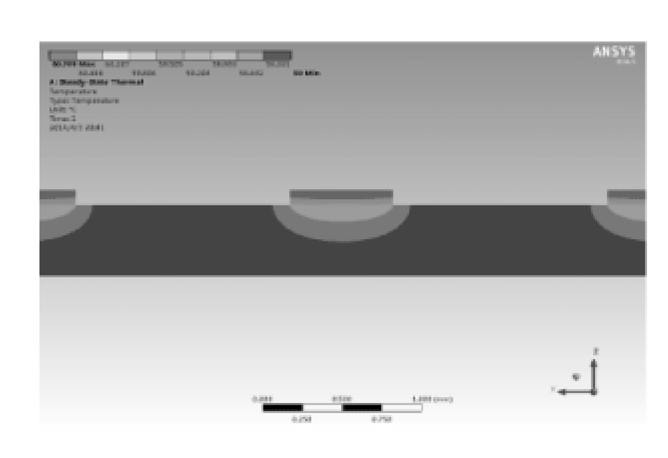
图5-35 灯条模型网格划分的局部

续表

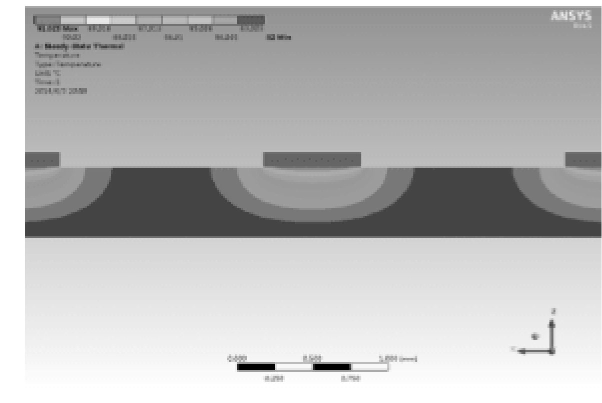
材　料　层	长/mm	宽/mm	厚/mm	热导/W/(m·K)
蓝宝石基板	30	1.5	0.5	25
石英基板	30	1.5	0.5	1.5
普通玻璃基板	30	1.5	0.5	0.75

仿真结果如下：

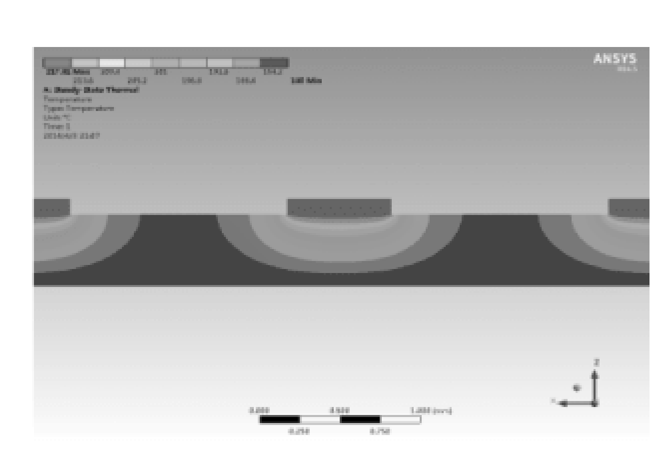
蓝宝石基板、石英玻璃基板、普通玻璃基板的热场分布云图见图 5-36，计算的结温见表 5-12。



(a) 蓝宝石基板



(b) 石英玻璃基板



(c) 普通玻璃基板

图 5-36　蓝宝石基板、石英玻璃基板、普通玻璃基板的热场分布云图

表 5-12　三种基板灯条热学模拟结果

材料层	LED 结温/℃	基板背面温度/℃	温差/℃	平均热阻/(K/W)
蓝宝石基板	60.709	58	2.709	5.85
石英玻璃基板	91.023	82	9.023	19.53
普通玻璃基板	217.81	180	37.81	81.84

从表 5-12 中的相关数据可以得到结论：蓝宝石基板与石英玻璃基板灯条的 LED 结温分别为 60.7℃、91.0℃，均低于 LED 芯片的安全结温，其热阻分别为5.8K/W 和 19.5K/W；而普通玻璃基板灯条的热阻高达 81.8K/W ，其 LED 结温高达 217.8℃，已远远超出了 LED 芯片的安全结温，因此，普通玻璃并不适合于灯条基板。

2. 全角度 LED 灯丝球泡灯的热学模拟

LED 灯丝球泡灯的灯罩是一个与外界隔绝密封的玻璃腔，不同于钨丝灯球泡内的真空，其内应充满空气或惰性气体。灯泡点亮正常工作后，灯条产生的一部分热量会通过与其直接相连的热导率较高的铜丝传导至灯座，与铜丝另一端相连接的是热导率较低的玻璃支架，少部分热流量通过玻璃柱传导至灯座，最终通过灯座传递至空气中。由于铜丝线径较细、玻璃支架热导率较低，通过上述两个热通道所散热量有限。为了降低该灯的总热阻，球泡内灌充高热导率气体可以提高导热能力；同时借助球泡内的温度差产生的气体对流将灯条热量传至球泡灯罩，再由球泡罩外空气的对流将热量传递至空气，达到散热、降低 LED 芯片结温的目标。由于球泡内填充空气无需额外成本，因此，空气作为考虑的首选气体。

本球泡内并联 4 根灯条，等距离、对称地通过铜丝固定在玻璃支架四周，总输入电功

率为 2.64W，总的热载荷为 1.848W（输入电功率的 70%），设环境温度为 24.9℃，采用 FloEFD 软件仿真模拟分析该 LED 灯丝球泡的热特性。由于 FloEFD 软件可自动判定流体的流动状态，因此无需对流体流动的具体特性做额外的设定。通过对模型赋予材料、几何参数、划分网格之后，分析计算出球泡内灌充空气时 LED 灯丝球泡内外的温度场云图，模拟结果如图 5-37 所示。该软件也同时模拟了 LED 灯丝球泡内部及外部的气流轨迹云图，见图 5-38。

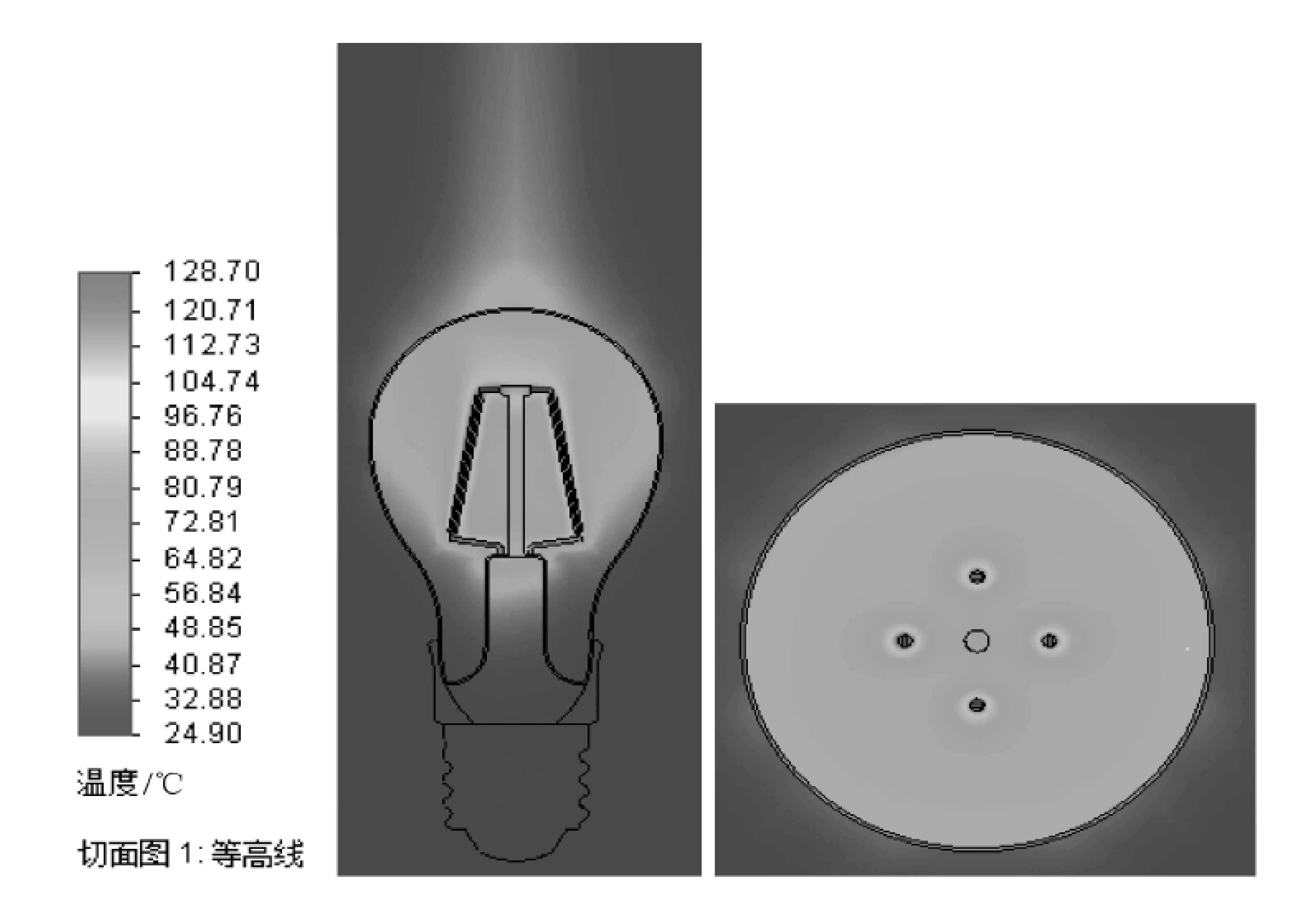


图 5-37　填充空气的全角度 LED 灯泡竖直剖面与水平剖面温度场的分布云图

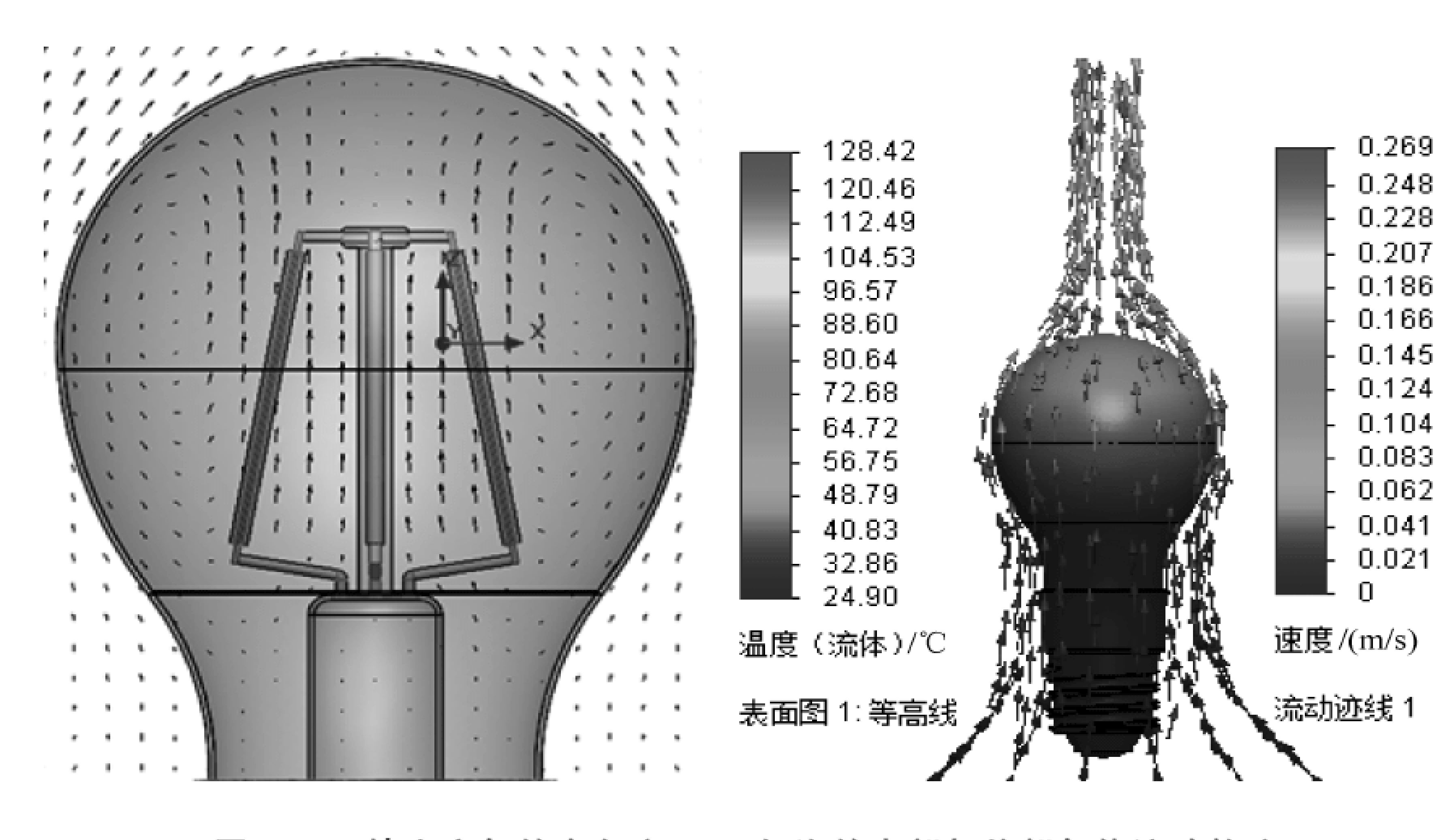


图 5-38　填充空气的全角度 LED 灯泡的内部与外部气体流动轨迹

由图 5-37 和图 5-38 可知在热稳态时，高温区集中在球泡内 LED 灯条附近，最高温度位于灯条顶部附近的 LED 芯片处，高达 128.7℃，超出了 LED 芯片厂家推荐的 110℃ 安全结温 18.7℃，将会大幅降低 LED 寿命，也极易对 LED 芯片造成损坏。从球泡内部与外部气体流动轨迹图可知，LED 灯条产生的热量分别使得球泡内、外的空气产生热对流运动。球泡内部，空气以玻璃支架为界分别做顺时针、逆时针的环流运动，将热量传递给灯罩。球泡外部，该热量使空气在灯罩外表面附近形成由下至上的空气流动，将热量不断散发到周围的环境中。

为了降低该类灯泡的 LED 结温，必须提高其散热能力，分别在灯泡内灌充氖气、氦气、50%氦气+50%氢气、氢气，上述各种气体的热导率见表 5-13 所示。在其他因素相同的条件下对灌充不同气体的 LED 灯丝球泡灯分别进行了仿真，得到了竖直剖面与水平剖面温度场的分布云图、内部与外部气体流动轨迹的云图。利用仿真结果可以求得到不同灌充气体条件下的 LED 结温，计算结果见表 5-14。

表 5-13　气体热导率(单位：W/(m·K))

气　体		空　气	氖　气	氦　气	氢　气
工作温度	0℃	0.024	0.046	0.146	0.175
	100℃	0.032	0.065	0.175	0.224

表 5-14　球泡内灌充不同气体的 LED 结温

气　体	空　气	氖　气	氦　气	50%氦气+50%氢气	氢气
结温/℃	128.42	121.42	91.45	86.13	83.95

由以上数据可以得到如下结论：

(1) 与灌充空气相比，球泡内灌充氖气、氦气、50%氦气+50%氢气、氢气后，LED 结温均明显降低，其降低幅度正比于气体的热导率；

(2) 灌充氖气灯泡的 LED 结温虽然明显低于灌充空气的，但是仍然高于 LED 芯片厂家推荐的 110℃ 安全结温，应谨慎使用；

(3) 灌充氦气灯泡的 LED 结温明显降低，已经低于 LED 芯片厂家推荐的 110℃ 安全结温近 18℃，可以安全使用；

(4) 灌充氢气灯泡的 LED 结温最低，已经低于 LED 芯片厂家推荐的 110℃ 安全结温近 26℃，降温效果最好，但氢气是易爆的危险气体，一般不宜使用；

(5) 灌充 50%氦气及 50%氢气的灯泡，其 LED 结温介于灌充氦气、氢气灯泡之间，已经低于 LED 芯片厂家推荐安全结温近 24℃，降温效果也很好。

由此可知，在 LED 灯泡内灌充高导热率气体可以明显降低灯泡内的传导热阻及总热阻，从安全性考虑，灌充氦气是相对较优的选择。

5.4.3　地铁用 LED 灯管

设计要求 LED 灯管在 30℃ 环境温度下长期稳定地工作，热稳态条件下 LED 的结温不超过 80℃。实际工作中测试结温较为困难，一般通过测试 LED 的焊点温度，再利用器

件热阻值计算 LED 的结温，公式如下：

$$T_j = T_s + R_{js}P \quad (5\text{-}4)$$

式中，T_j 为 pn 结温度；T_s 为 LED 灯珠焊点温度；R_{js}为 LED 的 pn 结至焊点之间的热阻；P 为热耗散功率。

以下讨论 T8 型 LED 灯管的热设计。该灯管由 LED 器件及热沉、保护罩、铝基 PCB 板、支架、灯罩等构成，各层使用导热膏连接。该灯置于地铁车厢内无风工作环境，环境温度 T_a=30℃，依靠灯管的自然对流及辐射进行散热。灯管使用 264 颗陶瓷封装 LED，每颗 LED 的工作电压 2.9V、工作电流 76mA、功率为 0.22W、器件热阻 R_{js}=35K/W，灯管总功率 58.1W。表 5-15 为灯管的相关材料的热参数。

表 5-15　尺 T8 型 LED 灯管相关材料的热参数

No.	灯具组件	材　料	热传导率/W/(m·K)	热辐射率
1	LED 封装基板	陶瓷	23	
2	集成电路板	AL5052	138	
3	LED 散热热沉	AL6063	180	0.55
4	光源保护罩	PC	0.193	0.94
5	灯具支架	AL6063	180	0.55
6	灯具灯罩	Glass	0.7	0.94
7	灯具绝缘层		1.0	
8	热界面散热膏材料	导热硅脂	1.0	

使用热学仿真软件进行模拟，图 5-39 为该灯管温度场云图，图 5-40 为该灯管的热流分布图。需要注意的是，该结果是将灯管放在无限大空间条件下仿真的结果，因此，在实际安装该灯管时需要在灯管上方的车厢留有相当大的空间用于提高空气对流速度，利于对流及辐射散热。从图 5-39 可知该灯管的最高温度点位于 LED 焊点处，达到 69.4℃，其他各部件的温度分布见表 5-16。在灯管内部和外部均产生了气流的流动，灯管内部 LED 器件处的空气流速最大，灯管外部其顶部的空气流速最高，也就是说该部分对对流散热的作用最大。最后根据上述数据及热阻公式可以求出该灯管中 LED 的平均结温为 77.1℃，可以满足使用要求。



图 5-39　灯具温度模拟结果

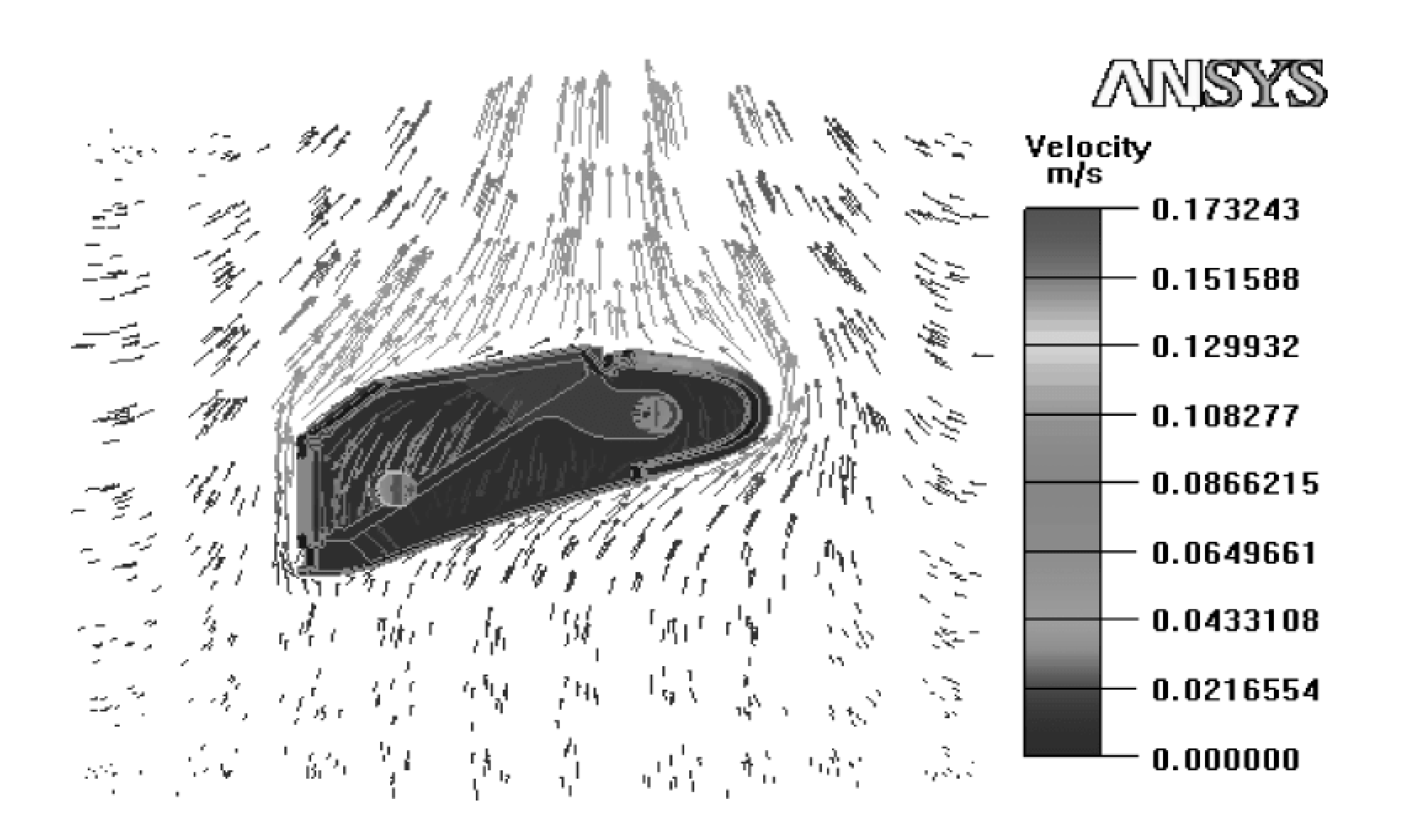


图 5-40　灯具热流分布图

表 5-16　LED 灯管各部分的温度分布

LED 焊点	集成电路板	LED 散热热沉	光源保护罩	灯具灯罩
69.4℃	68.1℃	66.9℃	41℃	39.5℃

5.4.4　LED 投光灯

一种大功率 LED 投光灯如图 5-41 所示，包括灯壳、支架、透光罩、反光杯、驱动电源、大功率 LED 器件、铝基电路板和翅片式铝型材散热器等。其中，LED 器件焊接在铝基板构成阵列光源，之后铝基板与散热器通过导热膏紧密相连，驱动电源另外置于散热器下方的电源盒中。该灯的散热主通道为：LED→铝基板→散热器→空气。散热部件的主要参数如表 5-17 所示。


(a) 大功率LED投光灯外观

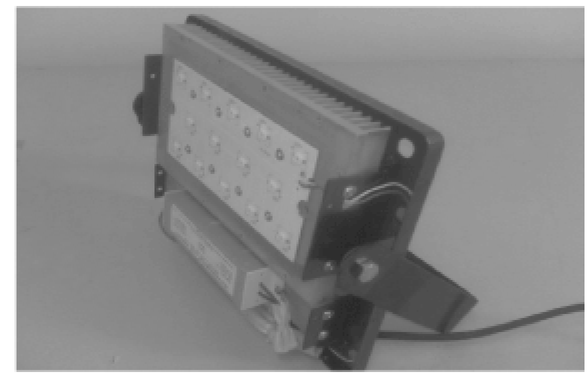

(b) 内部结构

图 5-41　大功率 LED 投光灯外观及内部结构

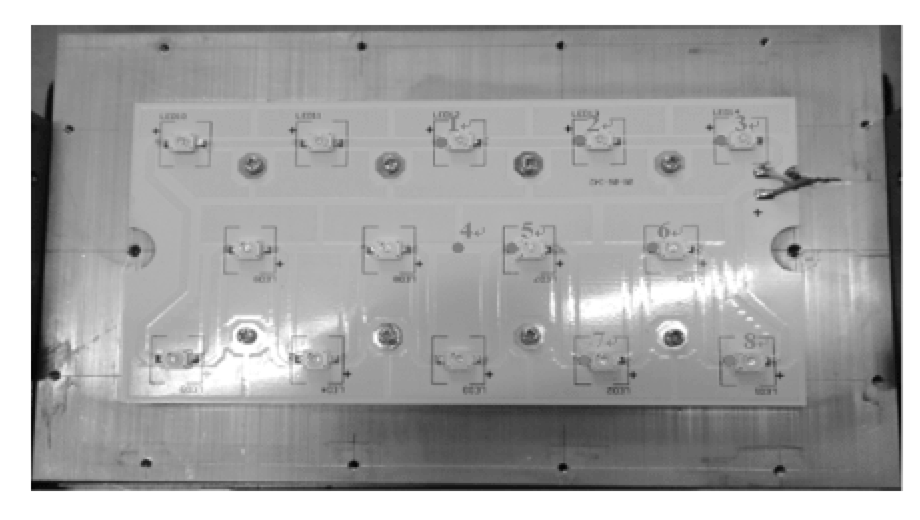
采用实验法、热阻网络法、计算机仿真三种方法讨论该灯的热设计。

表 5-17 大功率 LED 投光灯散热件物理参数

散 部 件	物理参数	符 号	单 位	物理量值
LED 器件	驱动电流	I_f	mA	480
	封装热阻	R_{LED}	K/W	11
	器件个数	N_{LED}	颗	14
铝基电路板	总长度	L_{MCPCB}	m	0.18
	总高度	H_{MCPCB}	m	0.092
	覆铜厚度	δ_{Cu}	m	7×10^{-5}
	覆铜导热系数	λ_{Cu}	W/(m·K)	387.6
	覆铜面积系数	f	——	0.8
	介电层厚度	$\delta_{Insulate}$	m	8×10^{-5}
	介电层热导率	$\lambda_{Insulate}$	W/(m·K)	0.7
	铝基厚度	δ_{Al}	m	1.5×10^{-3}
	铝基导热系数	λ_{Al}	W/(m·K)	205
铝型材散热器	底座长度	L_{Base}	m	0.23
	底座高度	H_{Base}	m	138
	底座厚度	δ_{Base}	m	8×10^{-3}
	肋片间距	S	m	6×10^{-3}
	肋片高度	W	m	0.018
	肋片厚度	t'	m	2×10^{-3}
	肋片数目	N_{Fin}	m	29
	导热系数	$\lambda_{Heatsink}$	W/(m·K)	205

1. 实验法

实验仪器包括热电偶测温仪和红外热成像仪。使用红外热成像仪测量 LED 灯具的整体温度场分布，使用热电偶测温仪测量特征点的温度值，并对红外热像仪进行发射率的校准。特征点主要选择 LED 器件的电极焊接点，特征点位置如图 5-42 所示。使用红外热成像仪测量铝基板上的 15 个点的温度，求出铝基板的算术平均值温度为 37.89℃，环境温度为 14.6℃，室内无风。图 5-43 为 LED 投光灯铝基板的红外热像图。



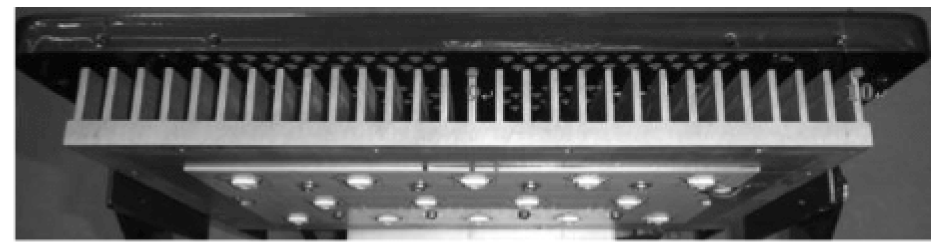


图 5-42 热电偶测温仪测量特征点的位置

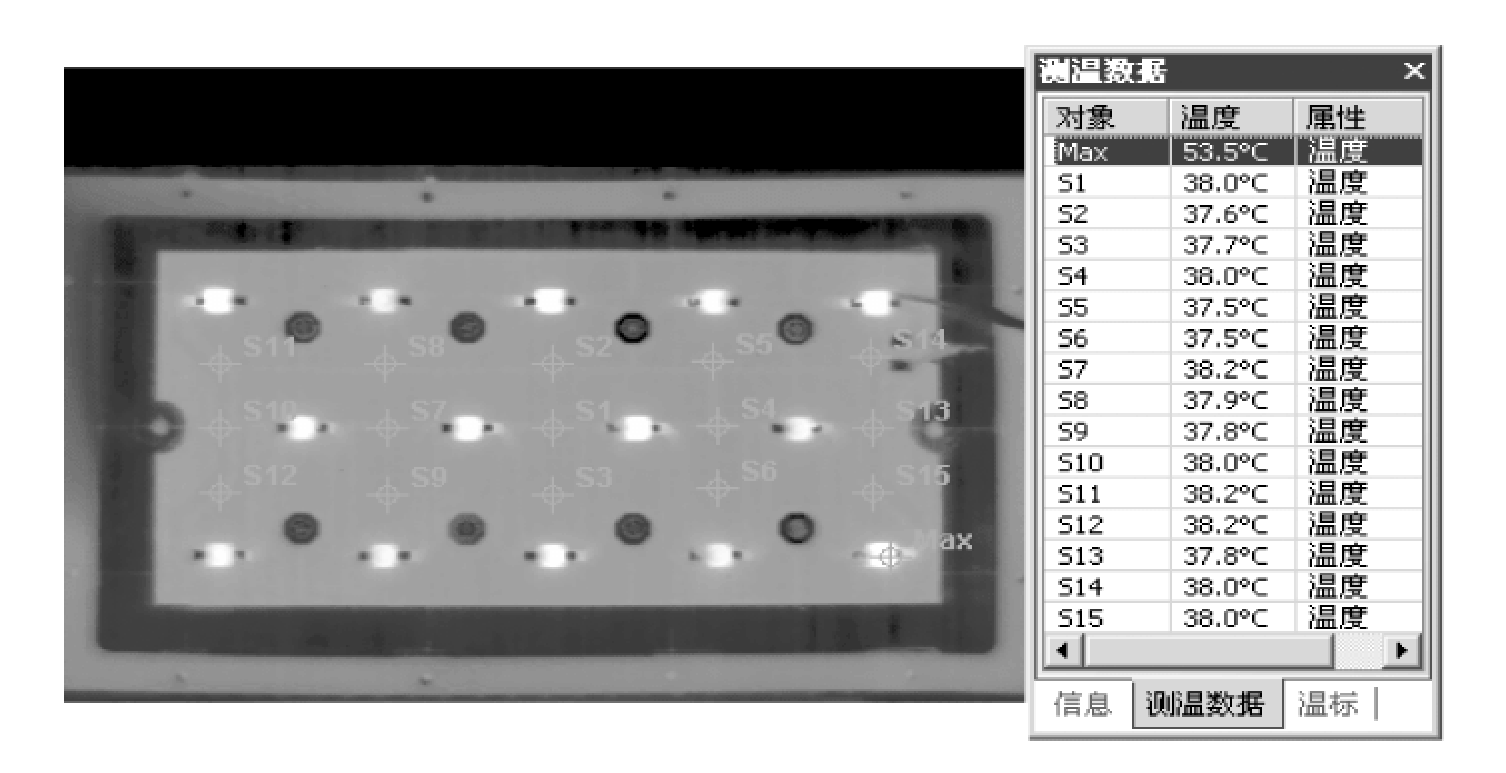


图 5-43　为 LED 投光灯铝基板的红外热像图

2. 热阻网络法

LED 投射灯物理模型为三维结构，需要在保持实际问题基本特点的前提下对物理问题简化处理，以便可以使用线性数学模型进行描述，假设：

（1）单颗 LED 器件的输入电功率 P 恒定为 1.5W，以电光转换率 15%计算，14 颗 LED 的散热总量 Q_{Total}恒等于 17.85W，且封装内热阻 R_{LED}维持不变；

（2）各结构件材质均匀，导热系数 λ 为常数；

（3）自然对流环境为标准大气压下的干燥空气，且温度 T_{Ambient}恒定为 14.6℃；

（4）自然对流换热系数 α 与肋片温度 T_{fin}相关；

（5）肋片厚度 t'远小于肋片高度 W，可忽略肋片末端和侧面的对流散热；

（6）安装界面上填充回流焊锡或高导热性硅脂，忽略界面热阻。

经上述简化处理后，所研究的物理问题即可转变为求解一维稳态传热问题。将前述的散热主通道转化为等效热阻网络，如图 5-44 所示。待计算出各散热构件的分热阻以及分热阻间的串、并联关系后，即可求得各结构面和 LED 芯片上的温度平均值。

由所建立的等效热阻网络，将芯片到环境的总热阻 $R_{\text{j-a}}$定义为

$$
\begin{aligned}
R_{\text{ja}} &= \frac{R_{\text{LED}}}{N_{\text{LED}}} + R_{\text{Cu}} + R_{\text{Dielectric}} + R_{\text{Al}} + R_{\text{Heatsink-base}} + R_{\text{Fin}} \\
&= \frac{T_{\text{Junction}} - T_{\text{MCPCB-up}}}{Q_{\text{Total}}} + \frac{T_{\text{MCPCB-up}} - T_{\text{Heatsink-base}}}{Q_{\text{Total}}} + \\
&\quad \frac{T_{\text{Heatsink-base}} - T_{\text{Fin}}}{Q_{\text{Total}}} + \frac{T_{\text{Fin}} - T_{\text{Ambient}}}{Q_{\text{Total}}}
\end{aligned}
\tag{5-5}
$$

式中，R_{LED}和 N_{LED}为物理模型的已知变量。R_{Cu}、$R_{\text{Dielectric}}$、R_{Al}和 $R_{\text{Heatsink-base}}$的计算相类似，均符合一维平板传导热阻的计算规律，可将所有已知变量数据直接代入平板热阻公式计算。

R_{Fin}为散热器传导与自然对流协同散热的情况，其热阻的总体表达式为

$$
R_{\text{Fin}} = \frac{1}{\alpha A \eta_{\text{Fin}}} = \frac{1}{\alpha \eta_{\text{Fin}}(2N_{\text{Fin}} W H_{\text{Base}})} \tag{5-6}
$$

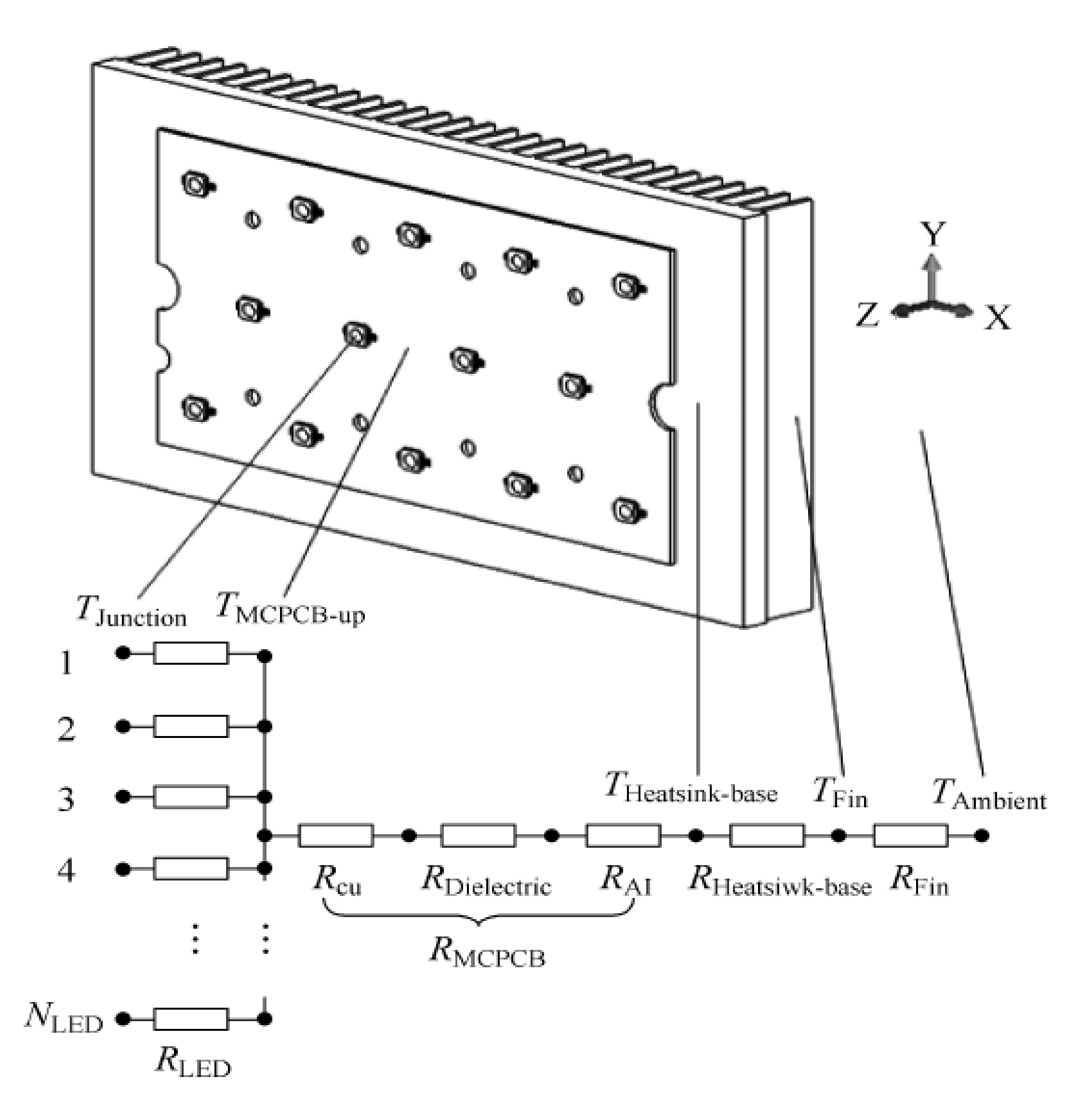


图 5-44　LED 投射灯简化的物理模型及等效热阻网络图

式中,A 为肋片散热面积的总和;肋片效率 η_{Fin} 是传导主要影响的参数,可由下式计算得到。

$$\eta_{\text{Fin}}=\frac{\tanh(mW)}{mW}=\frac{\tanh\left(\sqrt{2\alpha/(\lambda_{\text{heatsink}}t')}\,W\right)}{\sqrt{2\alpha/(\lambda_{\text{heatsink}}t')}\,W} \tag{5-7}$$

公式(5-6)、(5-7)中均含有未知的对流换热系数 α,对于矩形肋片散热器自然对流换热的情况,经 Van de Pol 等修正后的 Elenbaas 方程与实测数据吻合得很好,计算式如下:

$$\alpha=\frac{\lambda_{\text{Air}}}{r}Nu=\frac{\lambda_{\text{Air}}}{r}\cdot\frac{R_{\text{a}}}{\Psi}\left[1-\mathrm{e}^{-\Psi(0.50/R_{\text{a}})^{3/4}}\right] \tag{5-8}$$

式中,

$$\Psi=\frac{24(1-0.483\mathrm{e}^{-0.17/a^*})}{\{(1+a^*/2)[1+(1-\mathrm{e}^{-0.83a^*})(9.14\sqrt{a^*}\,\mathrm{e}^{-0.4646S}-0.61)]\}^3} \tag{5-9}$$

$$R_{\text{a}}=\frac{g\beta(T_{\text{Fin}}-T_{\text{Ambient}})r^3}{\nu a}\frac{r}{H_{\text{Base}}},\quad r=\frac{2WS}{2W+S},\quad a^*=\frac{S}{W}$$

在式(5-8)的计算中,可将已知变量数据直接代入,但涉及空气物性中的膨胀系数 β、运动黏度 ν、热扩散系数 a 以及导热系数 λ_{Air},则通常需要通过定性温度 $t=(t_{\text{Fin}}+t_{\text{Ambient}})/2$ 手工查阅空气物性表来确定。0～100℃温度范围内,空气物性参数与温度的关系可以拟合成二阶多项式方程,计算的最大误差小于±1%。

$$\beta=3.66\times10^{-3}-1.25\times10^{-5}\times t+2.72\times10^{-8}\times t^2 \tag{5-10}$$

$$\nu=1.33\times10^{-5}+8.92\times10^{-8}\times t+9.99\times10^{-11}\times t^2 \tag{5-11}$$

$$a=1.88\times10^{-5}+1.27\times10^{-7}\times t+2.04\times10^{-10}\times t^2 \tag{5-12}$$

$$\lambda_{\text{Air}}=2.438\times10^{-2}+7.75\times10^{-5}\times t-8.16\times10^{-9}\times t^2 \tag{5-13}$$

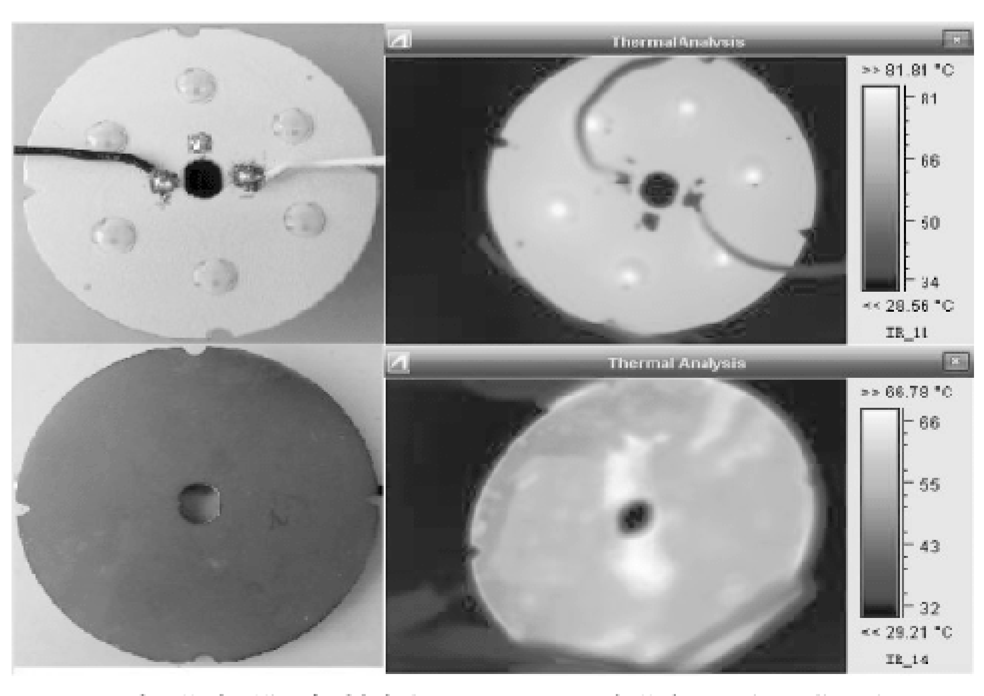
最终求得 LED 芯片结温为 53.60℃,铝基电路板上表面平均温度为 38.30℃,与实验

测量数据 37.89℃吻合性较好。

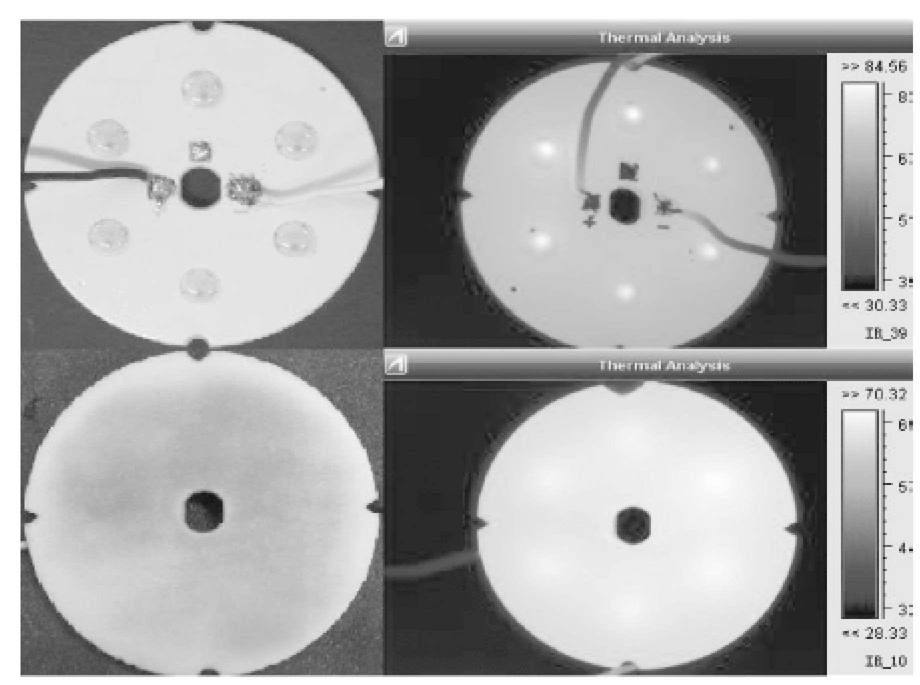
5.4.5 球泡灯照明模组的辐射散热

将 1W 正装 LED 芯片直接封装在直径为 60mm、厚度 3mm 的氧化铝陶瓷基板电路层，芯片外点涂掺有黄色荧光粉的透明硅胶，固化过程中自然成型半球透镜。电路层采用厚膜工艺将银钯浆料烧结在陶瓷基板上，并喷涂白油绝缘保护。为了提高基板的散热能力，在陶瓷基板背面的表面涂覆发射率约为 0.92 的红外辐射材料。

使用红外热像仪拍摄了背面涂覆有红外辐射材料的 COB 型 LED 光源样品，同时也拍摄了未涂覆红外辐射材料的相同氧化铝陶瓷基板制作的光源样品，见图 5-45。由图可见，未涂覆红外辐射膜层的光源模组其 LED 表面的最高温度为 84.56℃，涂覆红外辐射膜层后降为 81.81℃。用于测试的环境同为在室内无风的密闭空间，其他测试条件也相同，由此可知照明组件背面涂覆的红外辐射材料确实提高了模组的辐射散热能力。



(a) 氧化铝陶瓷基板COB-LED光源正面、背面（表面涂覆红外辐射材料）及温度场分布



(b) 未涂覆红外辐射材料的同类光源及温度场分布

图 5-45 氧化铝陶瓷基板 COB-LED 光源正面、背面的照片及温度场分布

思考题

1. 照明模组、照明光源与 LED 灯具的联系与区别分别是什么？
2. LED 灯具由哪些部件组成？各自的作用是什么？
3. 试说明 LED 驱动电源的种类与特点。
4. “非隔离式电源制作的 LED 灯具安全性差”，这种说法对否？说明原因。
5. 试论述 LED 室内灯具和室外灯具设计的异同。
6. LED 灯具散热的主要方式有哪些？
7. 一体化照明光源中的热源有哪些？热设计中应注意哪些问题？
8. LED 灯具热设计的主要原则是什么？
9. LED 灯具热设计的流程是什么？
10. LED 灯具散热器的热阻包括哪些？如何减小？
11. 试搭建一种测试 LED 灯具结温的设施并说明其原理与方法。

习题

1. 试推导图 4-16 球泡灯的热阻网络,并讨论如何提高散热能力。

2. LED 路灯的照明模组为一铝基 PCB 板,将其安装在散热器上。直接用四个螺钉固定,铝基板和散热器间会有大约 80%的区域留有平均厚度 0.2mm 的空气芯,在铝基板和散热器间涂满热导率为 1W/(m·K)的导热脂。涂导热脂后的接触热阻降低多少?

3. 对一 LED 工矿灯纯铝散热器表面进行硬质氧化处理,发射系数由处理前的 0.2 提高至 0.8,LED 结温降低多少?

4. 一 LED 筒灯使用了上下通透的太阳花散热器,借助于"烟筒效应"有效地提高了对流系数,对流系数提高了 10 倍,在保持 LED 结温不变的前提下,该灯的散热功率提高了多少?

5. 某型 LED 的额定工作电流为 500mA,为保证其结温不超过 80℃,其工作电流与环境温度应满足图 5-46 所示曲线。请推导出该关系曲线的表达式,并讨论在 LED 灯具热设计中该公式的意义。

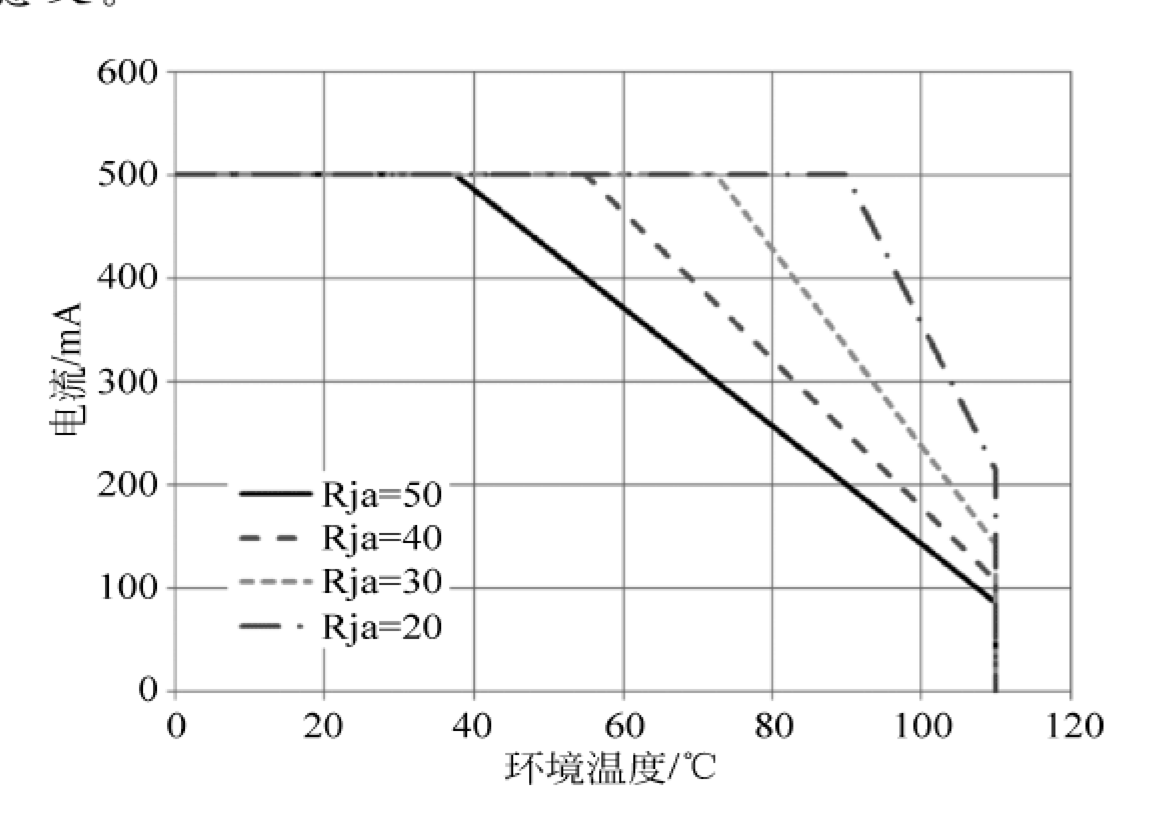


图 5-46 LED 工作电流与环境温度曲线图



中篇　LED热特性测试方法及测试平台

第6章 LED器件的瞬态热测试方法

LED 器件是一种能够将电能转化为可见光输出的固态半导体器件。LED 器件的发光原理是电致发光原理。LED 器件的特点非常明显，寿命长、光效高、无红外与紫外辐射和功耗低。这些特点决定着 LED 器件具有广泛的应用前景。

6.1 LED 器件瞬态热测试的步骤

LED 器件的瞬态热测试包括以下步骤：

（1）LED 器件温度敏感参数 TSP（temperature sensitive parameter）的测量和校准；

（2）对 LED 器件施加工作电流，测出温度瞬态曲线；

（3）数据处理，得出结构函数。

在 JEDEC 组织 JESD51-1 规定中，对瞬态热测试规定了两种测试方法：一种是动态测试法；另一种是静态测试法。不论哪种测试方法，首先都必须对 LED 器件的温度敏感参数 TSP 进行测量和校准。

6.1.1 LED 器件温度敏感参数的测量和校准

LED 器件的温度敏感参数 TSP 表征了 LED 器件的 pn 结在恒定正向电流下的正向电压 V_F 与结温 T_J 之间的相关性，它的测量和校准过程包括：把 LED 器件放置在一个温度控制的环境中，然后使样品的结温 T_J 与其周围的环境温度 T_A 达到稳定状态，同时施加恒定的测试小电流 I_M。V_F 被记录下来，并在多个不同的环境温度下重复该过程。最后，绘制出正向电压和结温的关系曲线，得到的直线斜率就是 LED 器件的温度敏感参数，一般记为 S_{VF}，单位为 mV/K。建议在 LED 器件温度敏感参数的测量和校准中使用 5 个温度值。

如图 6-1 所示，室温下对 LED 器件施加测试小电流 I_M，测量该电流下 LED 器件的正向电压值。改变环境温度，达到热平衡后，重复上述测量过程，即可测出该 LED 器件正向电压随温度的变化。图 6-2 表示了 LED 器件不同结温度下的 I-V 曲线，由图可知正向电压随着结温度的上升而下降。

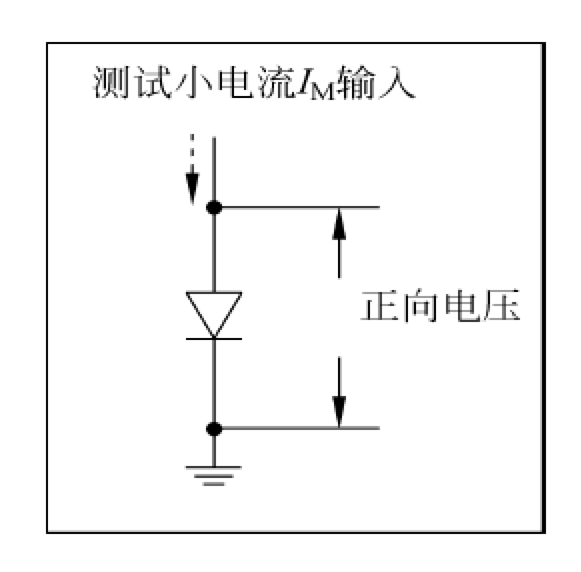


图 6-1　LED 器件在输入测试小电流 I_M 情况下，测量正向电压 V_F

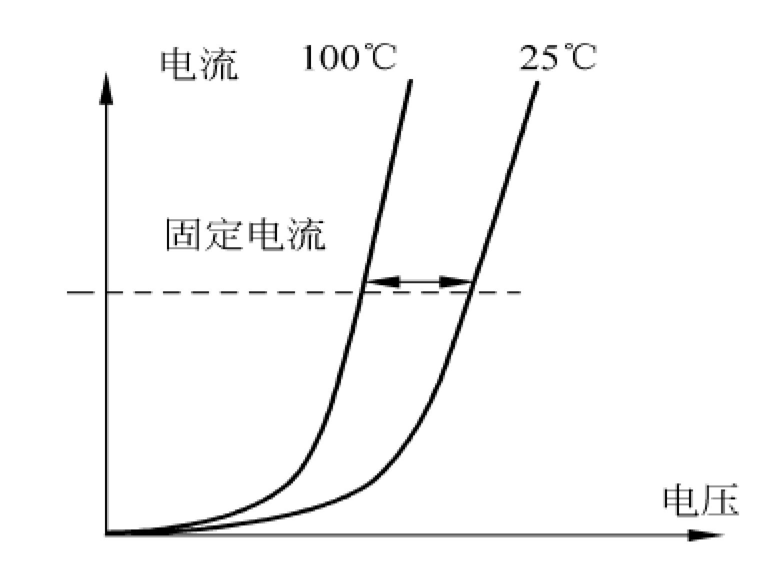


图 6-2　LED 器件不同结温度下的 I-V 曲线

通过实验进一步可知，当保持测试小电流 I_M 不变的情况下，例如输入的测试小电流 I_M 为 0.1mA 或者 1mA 或者 5mA，LED 器件的正向电压值随着结温度的变化而变化，具体来说在测试小电流 I_M 不变的情况下，正向电压值随着结温度的上升而下降，并且正向电压的变化和结温度的变化高度近似成线性关系。实验结果如图 6-3 所示。

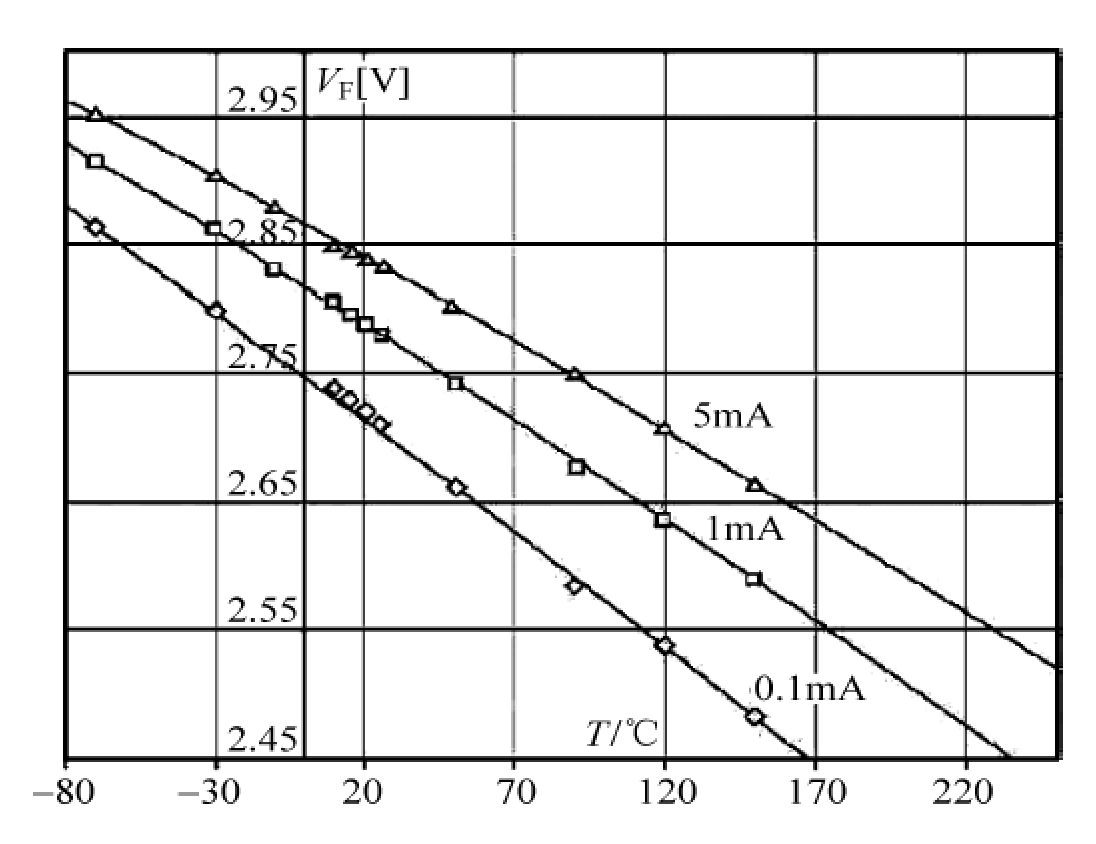


图 6-3　LED 器件在不同测试小电流 I_M 下正向电压具有的温度依赖关系

LED 器件的正向电压具有温度依赖关系，根据二极管肖克莱模型，理想的二极管特性方程为：

$$I_F = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{V_F}{nV_T}\right) - 1\right] \tag{6-1a}$$

其中，I_0 为二极管的反向饱和电流，可表示为：

$$I_0 = CT^m \cdot [\exp(-V_{G0}/nV_T)] \approx T^3 \exp\left(\frac{-q \cdot V_{G0}}{nkT}\right) \tag{6-1b}$$

$$V_T = \left[\frac{k}{q}\right]T \tag{6-1c}$$

式中：C——与 pn 结面积、掺杂浓度相关常量；

V_T——温度的电压当量，在室温下约为 25.69mV；

k——玻尔兹曼常数；

T——绝对温度，使用开尔文单位；

q——电子电量；

n——pn 结的理想因子，典型值为 1 和 2 之间，可通过 LED 器件的 I-V 曲线计算得出。当载流子的主要输运机制为扩散电流时，$n=1$；当载流子的主要输运机制为复合电流时，$n=2$。因此对于扩散-复合模型 n 应介于 1～2；

m——反向饱和电流 I_0 的温度依赖性中的功率因数(典型值是 3)；

V_{G0}——半导体材料热力学温度为零 K 时，导带底和价带顶的电势差，对于给定的半导体材料，V_{G0} 是一个常数。

对 LED 器件的正向电压公式重新进行排列，因为 $\exp(V_F/nV_T)$ 远远大于 1，得到的公式如下：

$$V_F = nV_T \ln\left(\frac{I_F}{I_0}\right) \tag{6-2}$$

代入二极管的反向饱和电流 I_0 的公式后，整理可得

$$V_F = nV_{G0} - \left(\frac{nk}{q}\ln\frac{C}{I_F}\right)T - \frac{nkT}{q}\ln T^m \tag{6-3}$$

上式是 pn 结正向电压作为电流和温度函数关系的表达式，它是 pn 结温度敏感特性的基本方程。

对于给定的半导体材料，在允许的温度变化范围内，在施加恒定电流的情况下，pn 结的正向电压 V_F 对温度的依赖关系近似取决于以下的公式：

$$V_F = nV_{G0} - \left(\frac{nk}{q}\ln\frac{C}{I_F}\right)T \tag{6-4}$$

即正向电压 V_F 随温度的升高而线性下降。

通过实验以及公式推导可知，LED 器件正向电压随温度的变化关系高度近似为线性，并且该线性条件在很大的温度范围内都是成立的。因此，可以用 pn 结恒定电流下的正向电压值来指示结温度变化，此时就像在 LED 器件中埋入了一个“虚拟的热电偶”一样，可以用 LED 器件结电压的变化来指示结温度的变化，LED 器件的 K 系数是 LED 器件温度敏感参数 S_{VF} 的倒数：

$$K = \frac{1}{S_{VF}} \tag{6-5}$$

6.1.2 LED 器件的瞬态热测试

被测 LED 器件的温度敏感参数测量和校准完成后，就可以进行瞬态热测试。在瞬态热测试中，LED 器件的测量采用四线测试设置(也被称为开尔文设置)的电学测试方法进行测量。

四线测试设置可以有效地减少测试电路中的接触电阻和接线电阻引起的误差，提高测量的精度。图 6-4 描述了基本的 LED 器件瞬态热测试的电路原理。

在 JEDEC 组织 JESD51-1 标准中，对瞬态热测试规定了两种测量方法，分别是动态法和静态法。

对被测 LED 器件使用“动态测试方法”进行测量，即：

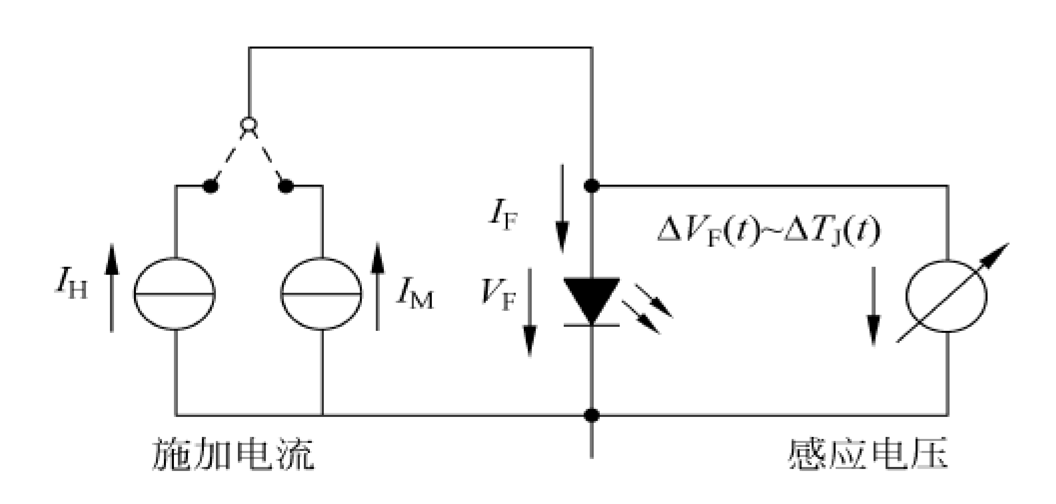


图 6-4　LED 器件瞬态热测试的电路

（1）使用加热电流对被测 LED 器件进行脉冲宽度预先设置的脉冲加热，加热结束后切换成测试电流，对被测 LED 器件的温度敏感参数进行单点测试，测试完成后通过被测 LED 器件的温度敏感参数转换为相应的结温，并记录下来；

（2）对被测 LED 器件进行冷却，冷却的时间至少等于此次加热电流预先设置的脉冲宽度，被测器件冷却后，再次进行下一次预先设定脉冲宽度的脉冲加热，其脉冲宽度大于上一次的脉冲宽度，加热结束后再切换成测试电流，进行单点测试，测试完成后通过被测 LED 器件的温度敏感参数转换为相应的结温，并记录下来；

（3）重复上述步骤进行多次的单点测试，并通过 LED 器件温度敏感参数和结温度的对应关系，瞬态热测试设备将会拟合得到被测 LED 器件的温度上升曲线；

图 6-5 表示了使用“动态测试法”进行瞬态热测试的过程。“动态测试法”的测量结果是由很多个温度上升的点拟合而成的被测 LED 器件的温度上升曲线。而这些点是通过很多个独立的脉冲宽度不同的脉冲加热电流对被测 LED 器件进行加热，加热结束后切换成测试电流，对被测 LED 器件的结电压进行单点测试，测试完成后通过被测 LED 器件的温度敏感参数转换为相应的结温。

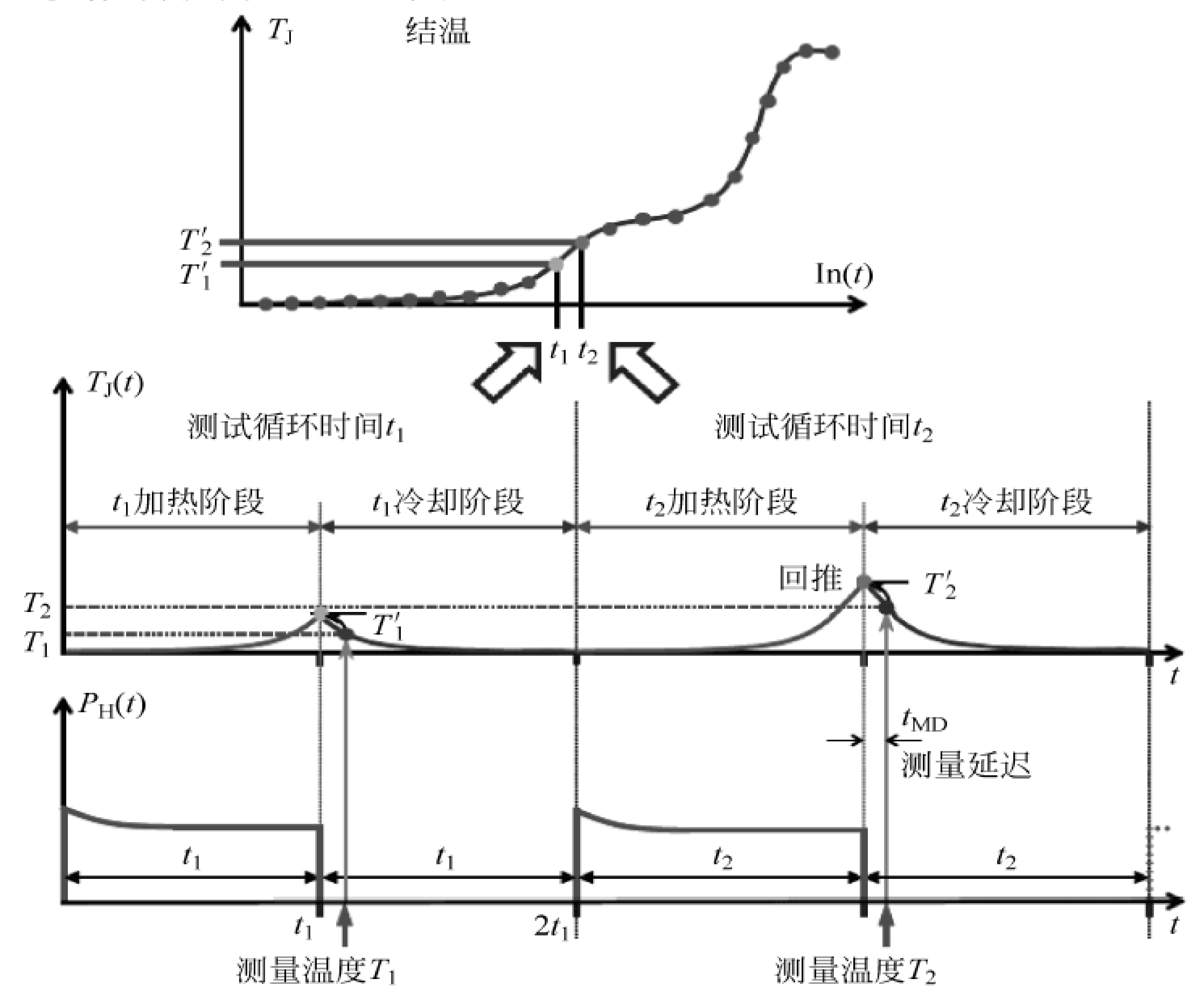


图 6-5　瞬态热测试的动态法的测量原理

在这种测试方法中，每个温度上升点的获得都存在初始电气噪音，并且在获得瞬态热阻抗曲线 Z_{th} 的过程中存在数据校正的问题，因此"动态测试法"存在着很大的失真。特别是针对 LED 器件的测试，因为 LED 器件的发光效率和光功率均与温度相关，因此在测试过程中，加热会引起功率剧烈变化。

另一测试方法为 JEDEC 组织 JESD51-1 标准定义的静态测试方法。此方法强调使用一个稳定的加热电流，使一个 LED 器件从"相对冷却"的热平衡状态到"相对加热"的热平衡状态。达到热平衡状态后，再切换掉加热电流，并在 LED 器件上通过微小的测试小电流对被测 LED 器件的结电压进行连续测量，此时瞬态热测试设备通过校准得到的被测 LED 器件的温度敏感参数所获得的结电压—结温度一一对应的关系，从而得到被测 LED 器件的瞬态热测试的温度响应曲线，直到和环境温度达到一个"相对冷却"的热平衡状态，在很短的时间内就可以完成一个完整的 LED 器件热特性测量，如图 6-6 所示为静态测试方法示意图。通过软件分析可以得到半导体器件在一个给定的环境中的非常精确的结温度随时间的瞬态变化曲线。

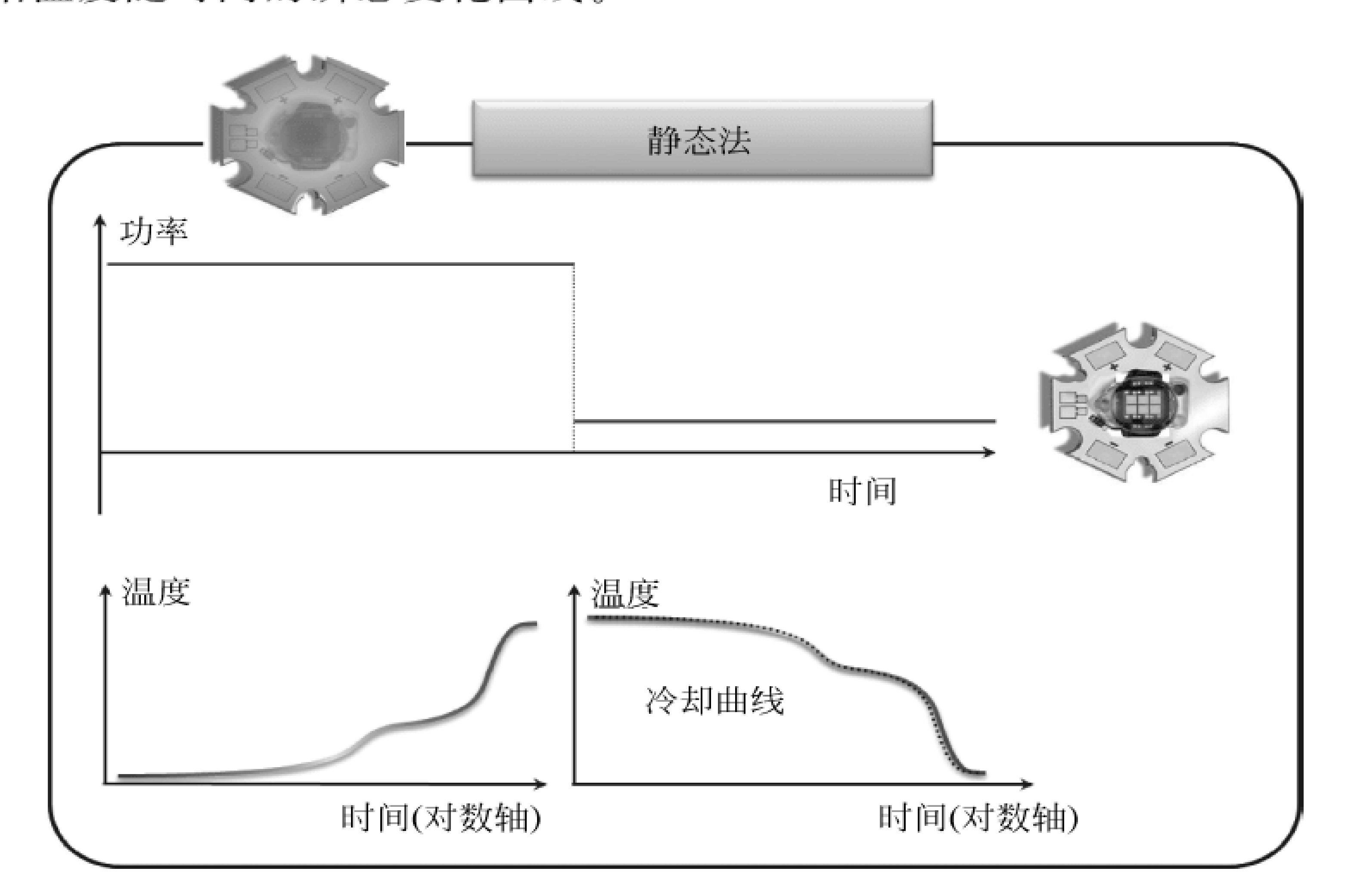


图 6-6 瞬态热测试的静态测试方法示意图

对被测 LED 器件使用"静态测试方法"进行测量，即通过施加在被测 LED 器件上功率的切换，可以得到结温度随时间变化的曲线，主要过程如下：

(1) 使用测试小电流 I_M 取得被测半导体器件的温度敏感参数 S_{VF}(mV/℃)，得到正向电压随结温度变化的关系；

(2) 使用加热电流 I_H 进行加热，直到和环境达到一个热平衡状态；

(3) 当达到热平衡状态时，切换成测试小电流 I_M 进行测量；

(4) 当切换到测试小电流 I_M 后，被测 LED 器件由于失去了加热电流 I_H 的维持，结温度会下降，此时 LED 器件的正向电压被测量并记录下来，直到和环境温度达到新的热平衡状态；

(5) 被记录下来的正向电压数值通过被测 LED 器件的温度敏感参数 S_{VF}，被转换成为相应的结温度随时间变化的关系，示意图为 6-7 所示。

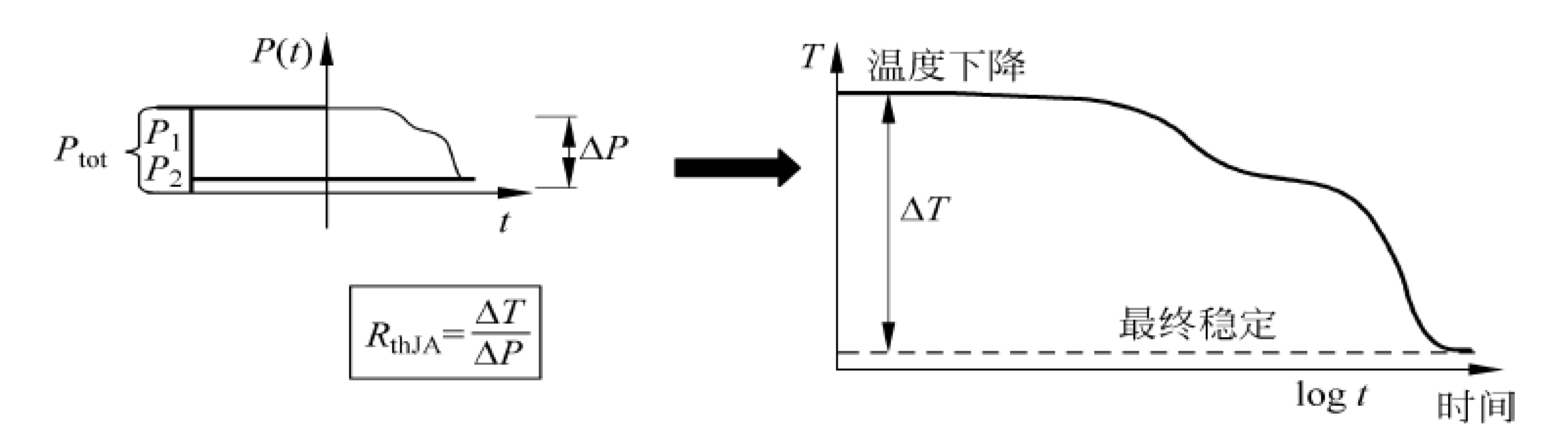


图 6-7　瞬态热测试的静态测试方法示意图

在瞬态热测试过程中，施加在被测 LED 器件上的功率发生了变化，变化的情况可以参考图 6-8。

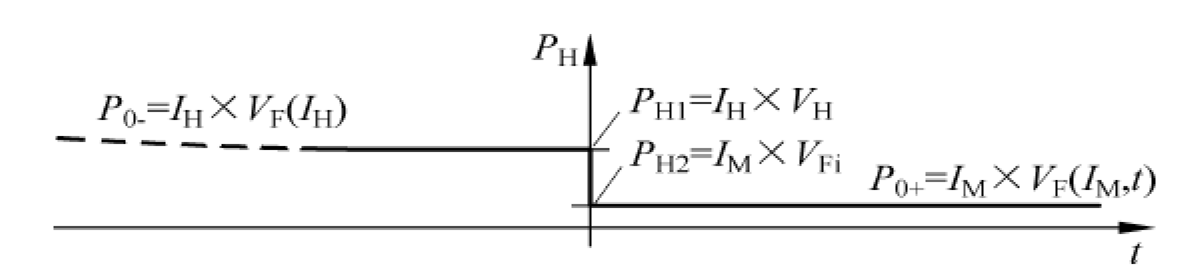


图 6-8　瞬态热测试中加热阶段和测量冷却曲线阶段，LED 器件的功率变化

在 JEDEC 组织 JESD51-51 标准中，描述了在瞬态热测试中，当加热电流 I_H 和测试小电流 I_M 切换时，被测 LED 器件的电气状态和热状态的转换可以通过 LED 器件的 *I-V* 特性曲线表示，如图 6-9 所示。

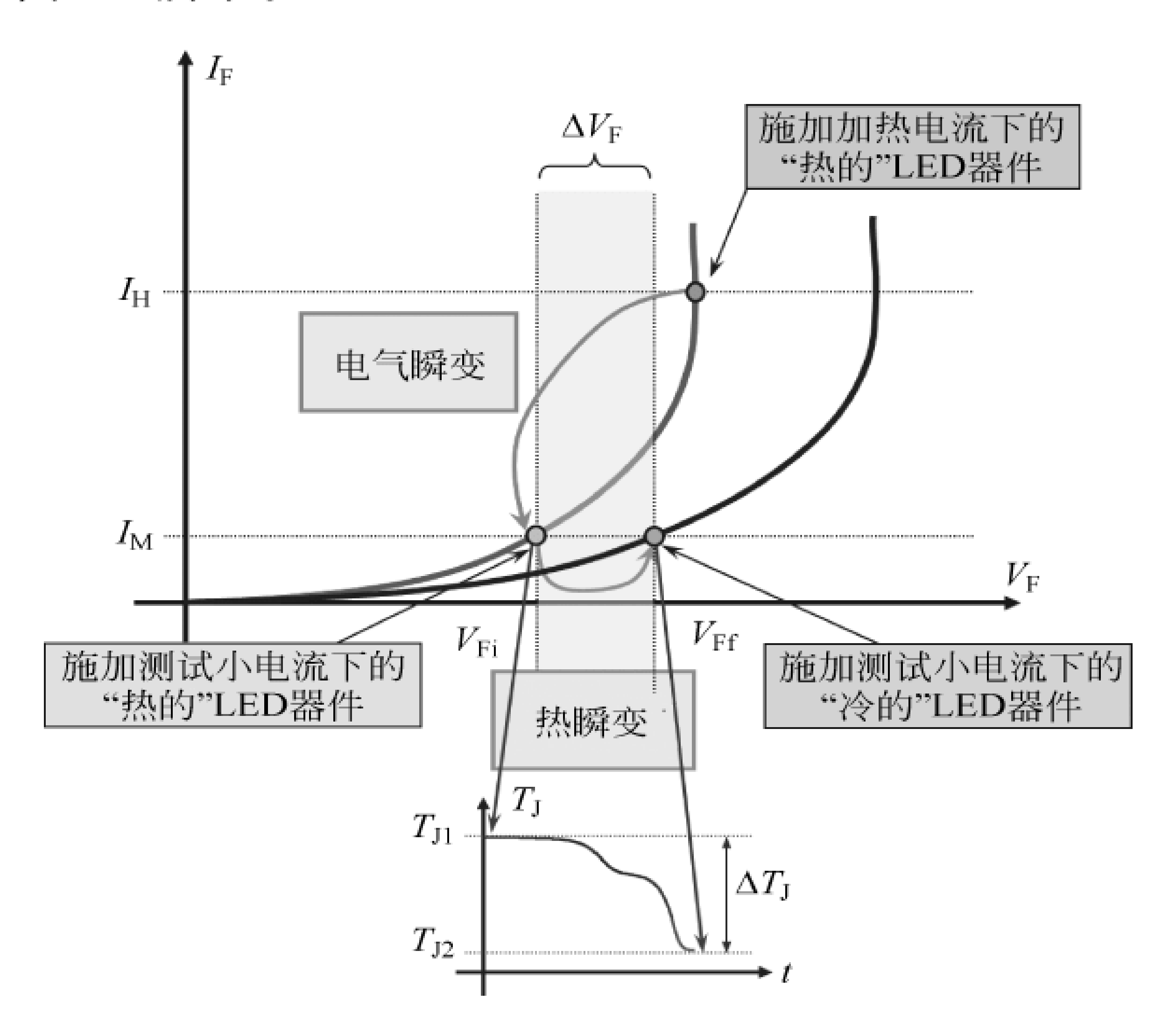


图 6-9　通过 LED 器件的 *I-V* 特性曲线表示的电状态和热状态转换

在瞬态热测试中，当加热电流 I_H 和测试小电流 I_M 切换时，被测 LED 器件的正向电压瞬态值随着时间发生的变化，如图 6-9 所示。

LED 器件在瞬态热测试中，$V_{F(t)}$ 正向电压对时间函数在开始阶段有很大的寄生电瞬态，又称为初始电气噪音，对应于从 I-V 特性曲线的工作点（V_H，I_H）到工作点（V_{Fi}，I_M）的跳跃。当二极管的正向电流在两个电流水平之间以阶跃的方式突然切换时，这种寄生电瞬态在 pn 结的 $V_{F(t)}$ 函数中被表现出来。

这个寄生电瞬态的持续时间是由对应于 I_H 加热电流下的扩散电荷的量降低到对应于 I_M 测试电流下的扩散电荷的量的速度决定的。同时，寄生电瞬态的速度也受到正向电流从加热电流 I_H 变为测试电流 I_M 的瞬态热测试设备电子开关速度的影响，及所使用的瞬态热测试设备的寄生电容的影响。加热电流 I_H 和测试电流 I_M 之间的差异越小，寄生电瞬态流逝、消失的越快。应用较高的测量电流 I_M 会减小电流差异，从而缩短寄生电瞬态的时间长度，并允许在正向电压测量中有更高的测试精度。

测试电流 I_M 的增加要特别注意在以测试电流 I_M 进行 LED 器件温度敏感参数的测量和校准过程中，不应发生严重的结的自发热。

对于图 6-10 中，t_{MD} 测量延迟时间的选择，在 JEDEC 组织 JESD51-14 标准以及 JESD51-51 标准中有明确的规定。即应确保抓取到与结温瞬态对应的第一个正向电压读数，也就是去掉寄生电瞬态（初始电气噪音）后，由结温度变化引起的正向电压变化的第一个真实的电压数值。

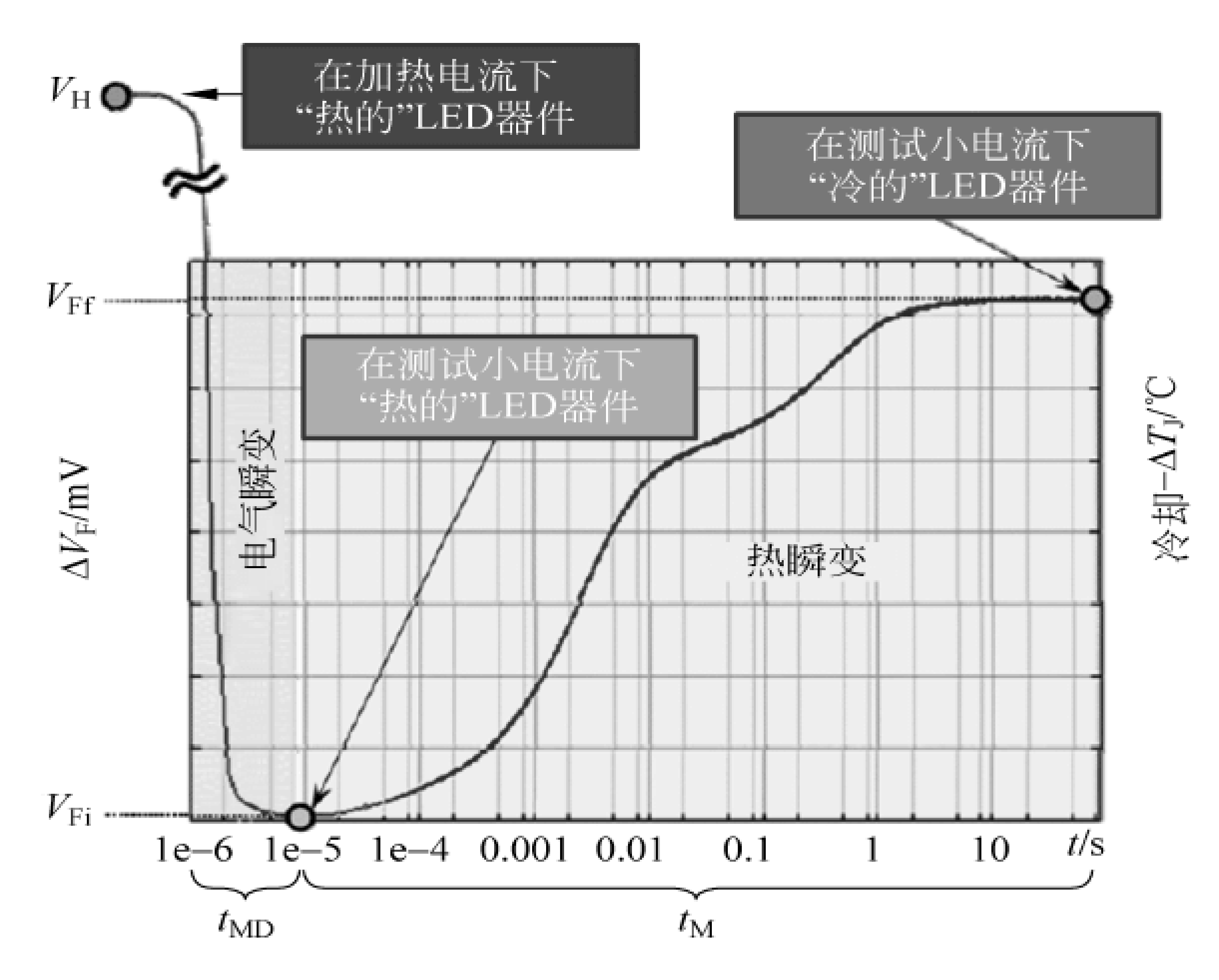


图 6-10　通过瞬态热测试表示的 LED 器件的电气状态和热状态转换

对于 LED 器件的瞬态热测试，因为

$$\Delta T_J = \Delta V_F \cdot K(I_M) \tag{6-6}$$

所以必须舍弃与 $V_{F(t)}$ 正向电压对时间函数的寄生电瞬态对应的 $\Delta T_{J(t)}$ 函数的数据点。LED 器件的热变化速度一般超过电变化速度，因此数据校正不应限于舍弃寄生电瞬态（初始电气噪音），而是结温瞬态变化应该外推算回切换的时间。

在 JEDEC 组织 JESD51-14 中，对 t_{MD} 测量延迟时间的选择有明确的规定。由于寄生电瞬态（初始电气噪音）的干扰，在时间上小于 t_{MD} 的测量延迟时间的数据点都必须被舍弃掉，但是在此 t_{MD} 的测量延迟时间内结温的变化却不能被忽略，如图 6-11 所示。对于短时间的 t，存在着结温变化 $\Delta T_{J(t)}$ 与根号时间轴 $\sqrt{t}$ 高度近似成线性关系，因此可以利用这

个关系外推 $T_{J(t)}$ 对根号时间轴$\sqrt{t}$的函数在 $t=0$ 时刻的结温变化。

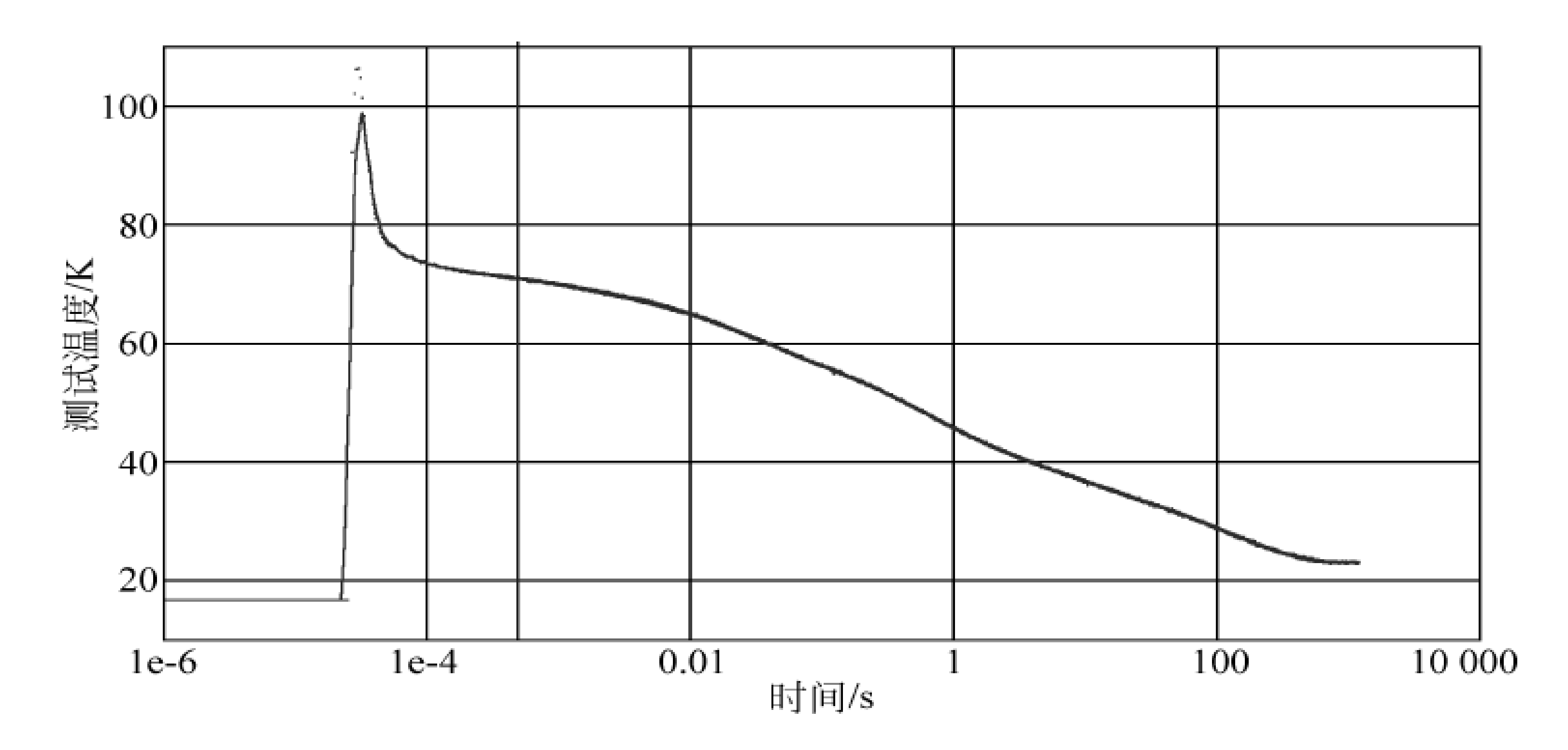


图 6-11　*X* 轴为对数时间轴的 LED 器件瞬态热测试曲线，因为加热电流和测试电流的切换，在很短的开始时间内，受到寄生电瞬态(初始电气噪音)的影响

按照 JEDEC 组织 JESD51-14 的规定对于一个均质材料的“半-无限”平板，即一个具有无限大表面积，能够确保垂直于表面的一维热流和无限厚度的平板，它的表面是受恒定的功率密度 P_H/A 进行加热，当加热功率打开/关闭时，可以观察到表面温度的上升/下降和加热时间/冷却时间的根号时间轴成线性关系。

$$\Delta T(t)=\frac{P_H}{A}\cdot K_{\text{therm}}\sqrt{t} \tag{6-7}$$

其中，$K_{\text{therm}}=\dfrac{2}{\sqrt{\pi c\rho\lambda}}$，$c$、$\rho$、$\lambda$ 相应的是平板材料的比热、密度、热导率。对于很短的时间，在硅芯片内部热传导约是一维传热，并且不受芯片底部表面边界效应的干扰的期间内，经过测量可以确认，开始的结温点 T_{J0} 可以通过 $T_{J(t)}$ 与根号时间轴$\sqrt{t}$ 的曲线，外推得到 $t=0$ 时刻的结温，如图 6-12 所示。

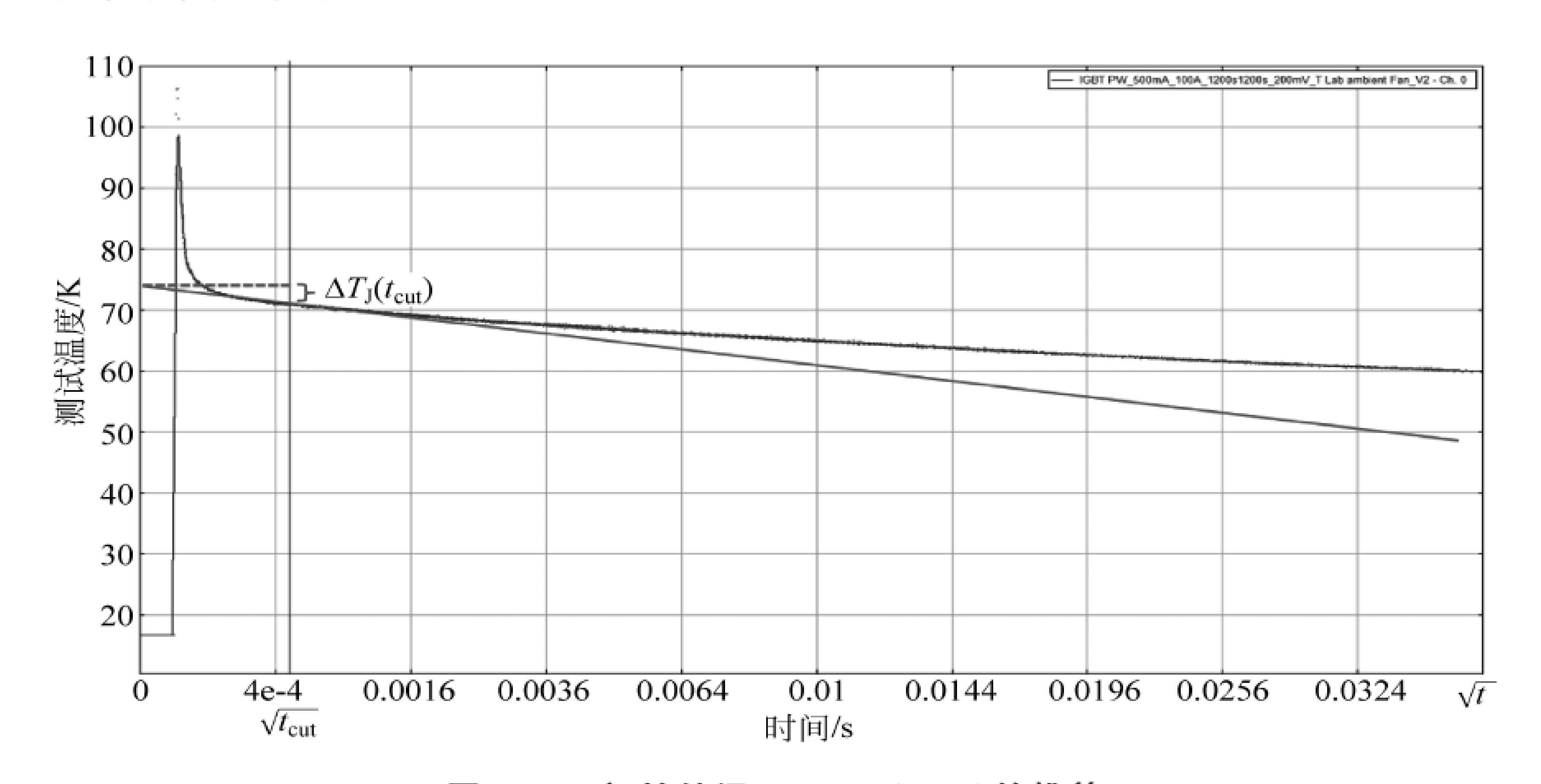


图 6-12　初始结温 $T_{J0}=T_J(t=0)$的推算

图中的斜率等于

$$m=\frac{\Delta T_J(t_{MD})}{\sqrt{t_{MD}}} \tag{6-8}$$

芯片的有源区面积 A 的估算可以通过以下公式得到：

$$A=\frac{P}{m}\cdot K_{therm} \tag{6-9}$$

在实际的瞬态热测试中，加热时间的设置应该至少与测量窗口的时间长度相同。

6.1.3 结构函数的理论基础

1. 结构函数具有的实际意义

被测 LED 器件进行瞬态热测试后，可以得到瞬态热测试的原始曲线，也就是结温随时间的变化曲线，如图 6-13 所示。

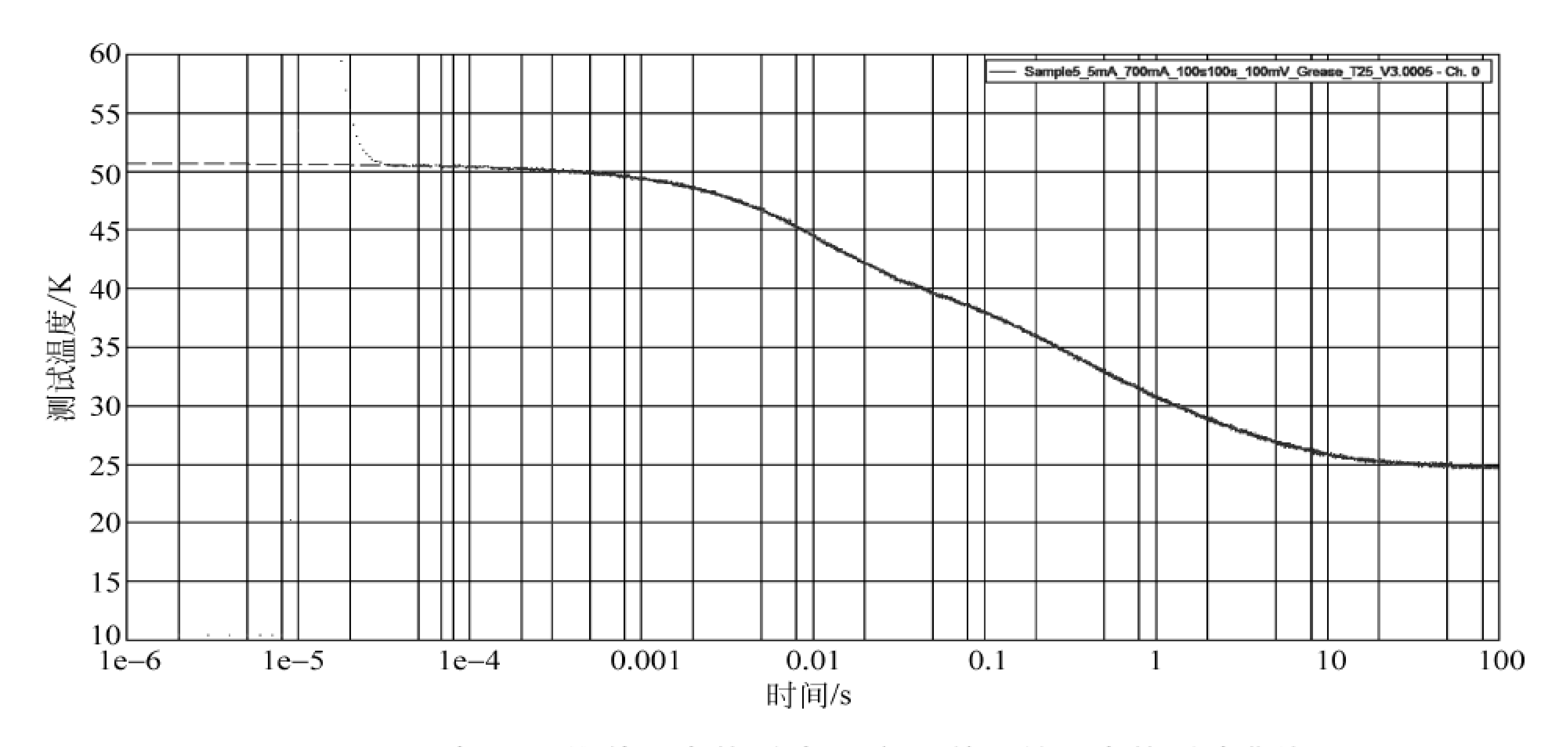


图 6-13　一个 LED 器件瞬态热测试后，得到的原始瞬态热测试曲线

图中，Y 轴是温度轴，也就是被测 LED 器件结温的变化可以从 Y 轴的读数中得到；X 轴是时间轴，需要注意的是 X 轴的时间刻度为对数时间轴，不是线性时间轴。

对于通过散热路径耗散的热量来讲，散热路径中的每一种材料都对热量存在着两种作用，一种是热学容纳，也就是热容 C_{th}；一种是热学阻碍，也就是热阻 R_{th}，因此散热路径也可以通过 RC 网络模型进行表达。对于 LED 器件所在的散热系统，它的主散热路径为热量从热源(Junction)，通过 LED 器件的壳(case)，通过粘结层(Glue or Solder Layer)，通过基板(Board MCPCB)，通过散热器(Heat Sink)，向环境散发。

瞬态热测试的原始曲线中，Y 轴的幅值表示被测半导体器件结温度的变化范围，可以表示为 ΔT_J，它与散热路径中的热阻 $R_{thj\text{-}a}$ 相关，可以通过以下公式表达：

$$\Delta T_J = R_{thj\text{-}a}\cdot \Delta P_{H\text{-}corr}$$

观察瞬态热测试的原始曲线，可知被测半导体器件结温度随时间的变化有快有慢，

会在瞬态热测试的原始曲线上形成不同的拐点。因此,在瞬态热测试完成后得到的瞬态热测试的原始曲线中,散热路径上热阻和热容的影响已经包含在该曲线之中了,现在要做的就是将散热路径的热阻和热容,从曲线中萃取出来,得到散热路径的热阻和热容分布,也就是结构函数曲线。

因此,可以对瞬态热测试的原始曲线做数学处理得到瞬态热阻抗曲线(瞬态热阻 vs 时间),用数学手段对瞬态热阻抗曲线做反卷积变换,可以将函数从时间域变换到空间域,得到结构函数(热容 vs 热阻),可分析被测 LED 器件内部构造,如图 6-14 所示。

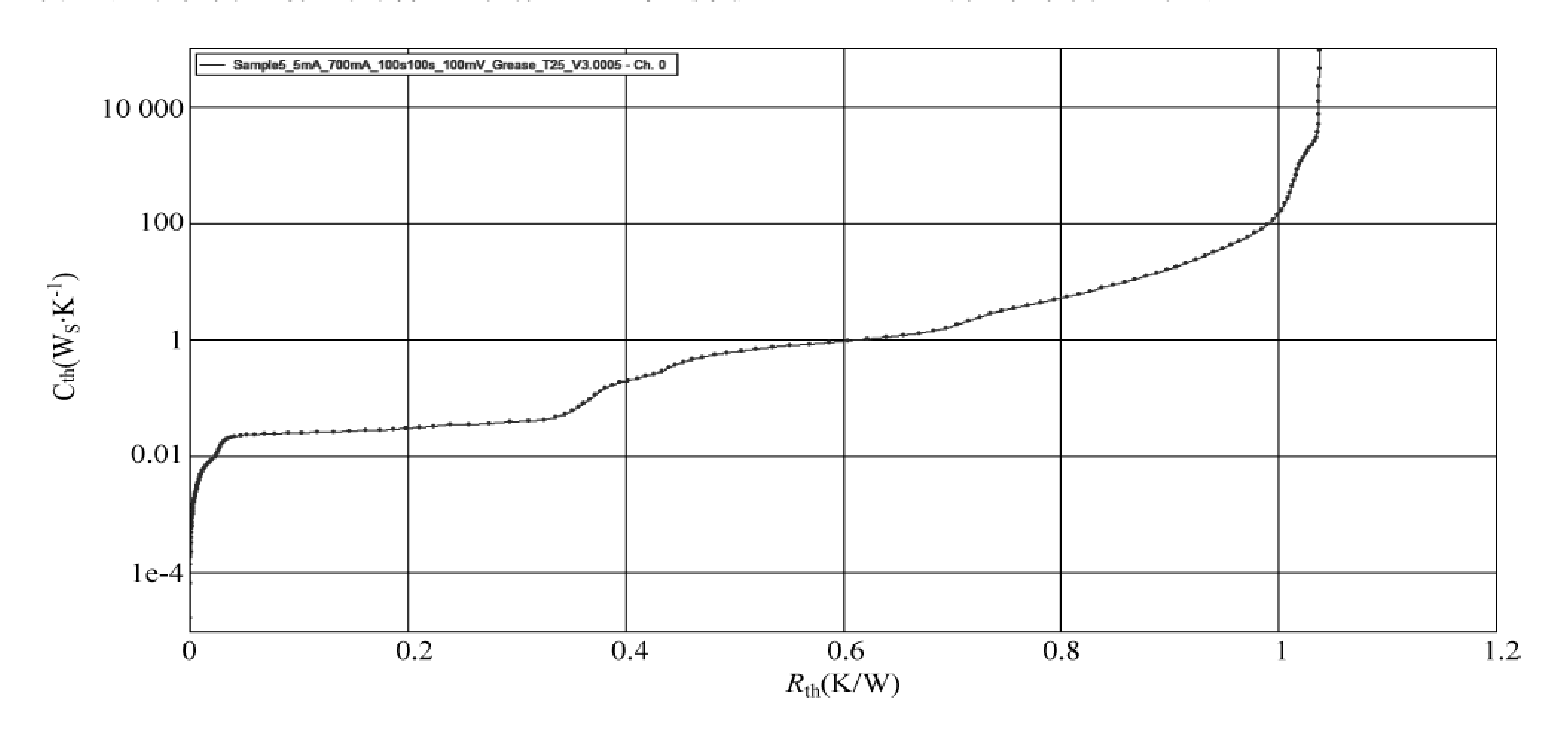


图 6-14 LED 器件瞬态热测试后,得到的结构函数曲线

一个如图 6-15 所示的被测半导体器件,它包括:半导体器件有源层(Junction),也就是热源,衬底(Silicon)、固晶层(Die Attach)、基板(Lead Frame)。将此被测半导体器件通过导热硅脂(Grease),粘结在一个水冷散热器上,那么一个很简单的散热系统就被搭建完成。当然,这个散热系统的主要散热路径是:热量从热源通过衬底、固晶层、基板以及导热硅脂,到环境-水冷散热器散发,成为近似一维散热路径。

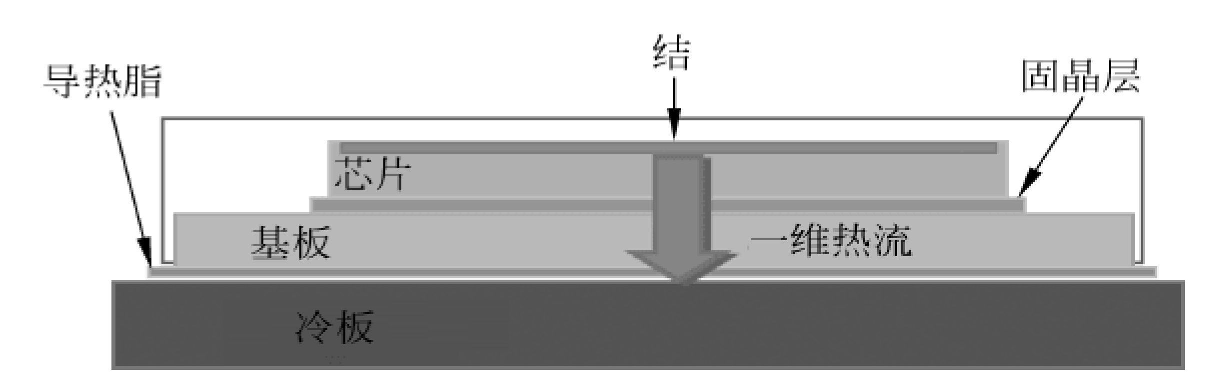


图 6-15 被测半导体器件搭建的一个简单的散热系统

对此散热系统中的被测半导体器件,进行瞬态热测试,可以得到结构函数曲线,并且结构函数曲线反映了热流路径上的所有热容与热阻分布,如图 6-16 所示。

结构函数曲线的纵轴为热容轴,横轴为热阻轴,是一个表示散热路径上热阻、热容分布的二维图。

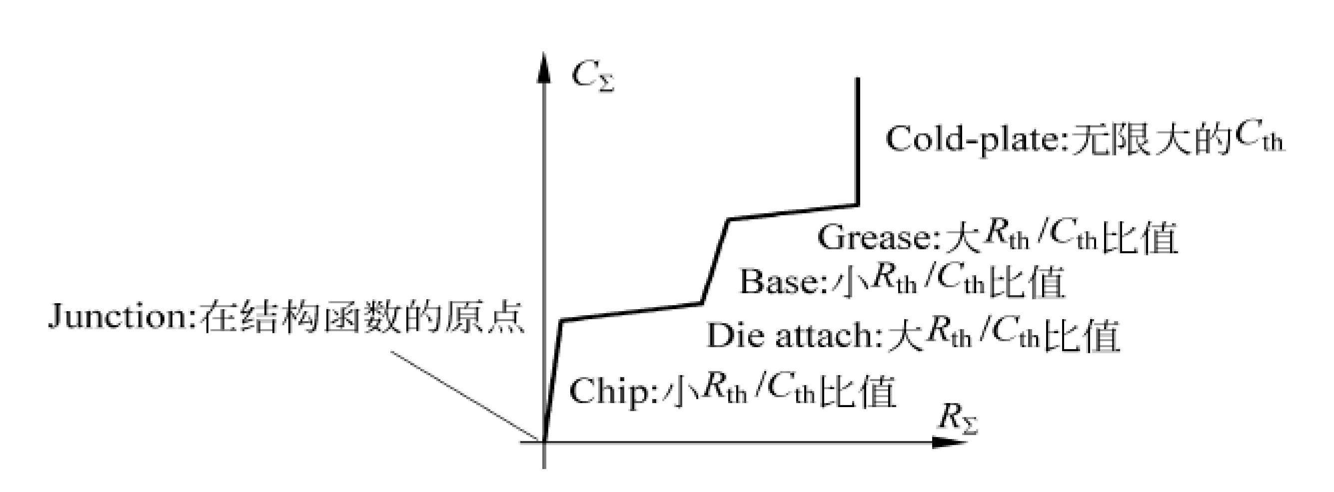


图 6-16　瞬态热测试后,得到的结构函数曲线

此二维图的原点就是热源,也就是热源永远在结构函数曲线的原点。热量沿着散热路径流动,会来到衬底,由于 Silicon 材料在常温下热导率约为 148W/(m·K),并且衬底在被测半导体器件中又有一定的体积,所以在纵轴为热容轴、横轴为热阻轴的结构函数的二维图上,表现出来的特性是热容的变化比热阻的变化剧烈一些,换句话说可以用一个斜率比较大的线段来表示衬底材料,即此线段拥有小的 R_{th}/C_{th} 比值。

热量继续沿着散热路径流动,会来到固晶层,由于 Die Attach 材料在常温下热导率为 1W/(m·K)到 10W/(m·K)不等,比衬底的热导率小一个数量级,并且固晶层在被测半导体器件中为薄薄的一层,体积非常小,所以在纵轴为热容轴、横轴为热阻轴的结构函数的二维图上,表现出来的特性是热阻的变化比热容的变化剧烈一些,换句话说可以用一个斜率比较小的线段来表示固晶层材料,即此线段拥有大的 R_{th}/C_{th} 比值。在结构函数曲线中,代表固晶层的线段会和代表衬底的线段形成一个拐点。

热量继续沿着散热路径流动,会来到基板,由于基板材料通常为金属材料,例如,铜基板在常温下热导率为 385W/(m·K),比固晶层的热导率大至少一个数量级,并且基板在被测半导体器件中拥有一定的体积,所以在纵轴为热容轴、横轴为热阻轴的结构函数的二维图上,表现出来的特性是热容的变化比热阻的变化剧烈一些,换句话说可以用一个斜率比较大的线段来表示基板材料,即此线段拥有小的 R_{th}/C_{th} 比值。在结构函数曲线中,代表基板的线段会和代表固晶层的线段形成一个拐点。

热量继续沿着散热路径流动,会来到导热硅脂,由于导热硅脂材料在常温下热导率为 1W/(m·K)到 5W/(m·K)不等,比基板的热导率小两个数量级,并且导热硅脂在散热系统中被涂抹为薄薄的一层,体积非常小,所以在纵轴为热容轴、横轴为热阻轴的结构函数的二维图上,表现出来的特性是热阻的变化比热容的变化剧烈一些,换句话说可以用一个斜率比较小的线段来表示导热硅脂材料,即此线段拥有大的 R_{th}/C_{th} 比值。在结构函数曲线中,代表导热硅脂的线段会和代表基板的线段形成一个拐点。

热量继续沿着散热路径流动,会来到水冷散热器,由于瞬态热测试是从一个"相对发热"的热平衡状态,测试到一个"相对冷却"的热平衡状态,因此当瞬态热测试完成后,热量会被水冷散热器完全吸收,水冷散热器拥有无限大的热容,因此测试得到的代表水冷散热器的线段,是一个平行于热容轴垂直于热阻轴的一条直线。

结构函数曲线可以反映从发热源(原点)到环境(最后直线向上部分)的热流路径上的所有热容与热阻分布。根据结构函数上斜率(热容与热阻的比值)变化,可以区分出代表不同材料的线段。用直观的方式,帮助分析散热路径上不同材料的热阻与热容。

积分结构函数曲线是一个很好的图形分析工具,可以用来分析散热路径上的物理结

构。在斜率较小的线段部分，热容变化较小，但是热阻变化较大，意味着这些线段部分的物理结构具有低的热导率或者小的横截面面积；在斜率较大的线段部分对应的物理结构具有高的热导率或大的横截面面积。当出现拐点时，意味着材料或几何形状发生了变化。通过这样的方式，热阻的数值、热容的数值、几何尺寸、传热系数以及材料参数都能从积分结构函数中直接读取。

为了更好地辨别出拐点的变化，可以将积分结构函数曲线求导得到微分结构函数曲线，如图 6-17 所示。在微分结构函数曲线中，尖峰对应着高热导率的部分，比如 Die 或者散热器；而谷底则对应着低热导率的部分，比如 Die Attach 或者空气。

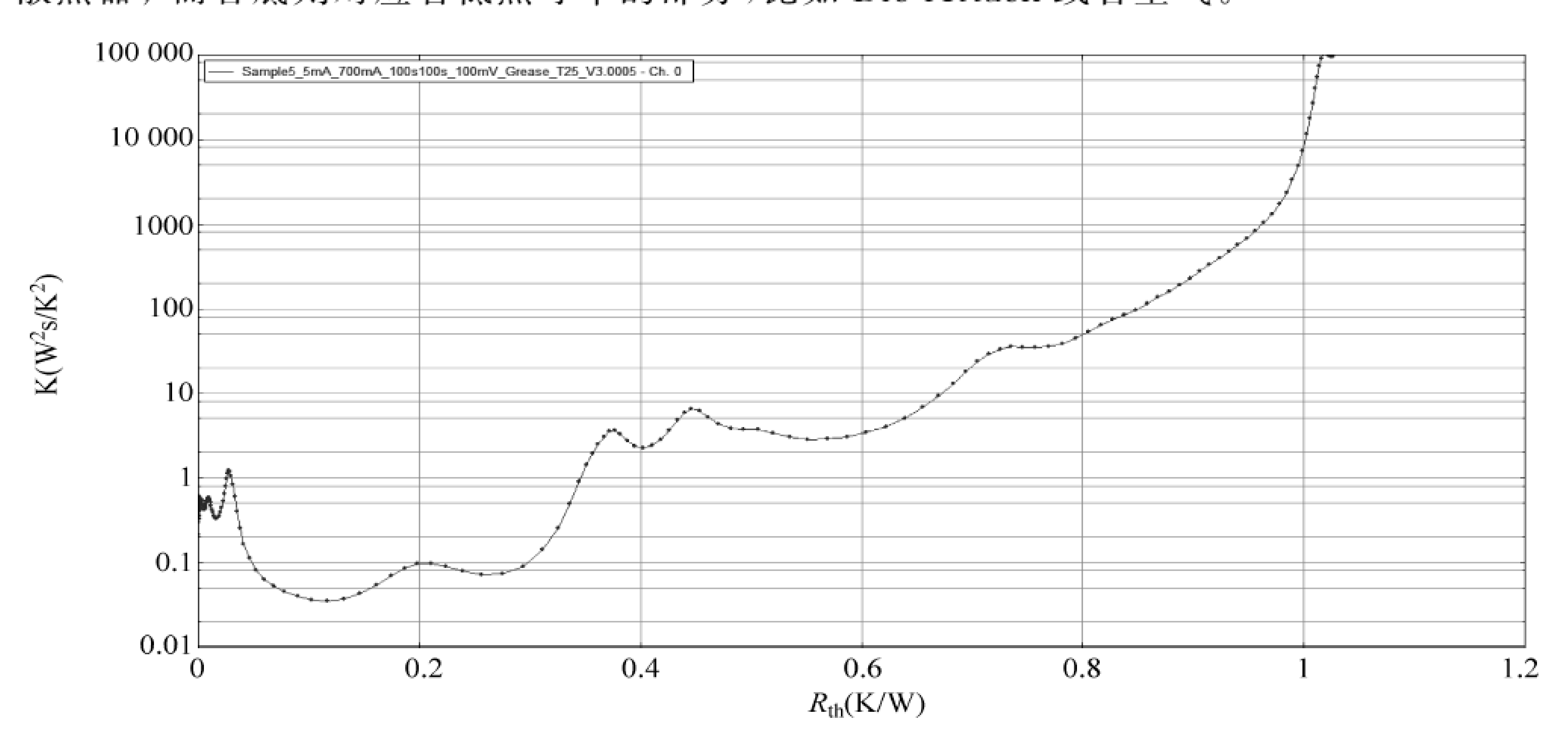


图 6-17　微分结构函数曲线

微分结构函数曲线的 Y 轴为

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}R_{\mathrm{th}}}=\frac{C_V\cdot d_x\cdot A}{\dfrac{1}{\lambda}\cdot\dfrac{d_x}{A}}=C_V\cdot\lambda\cdot A^2 \tag{6-10}$$

因此微分结构函数曲线可以得到沿散热路径的横截面面积的信息。

得益于瞬态热测试设备 T3Ster 系统非常高速的加热电流与测试电流的切换能力，瞬态热测试可以从微秒级开始，使分析被测 LED 器件内部的散热结构成为现实。同时基于 T3Ster 系统的连续、高速采样能力，可以提供工业级最高精度的结构函数。

2. 结构函数的工作方式

热学系统是分布的线性 RC 系统，因此可以用 RC 网络模型来代表。图 6-18 为一个简单的物理模型，如果热流通过这个物理模型，这个物理模型对热流会有两个方面的影响：一种是热学容纳，表现为热容 C_{th}；一种是热学阻碍，表现为热阻 R_{th}。

假设流经 a 表面和 b 表面的功率为 P，并且物理模型除了 a 表面和 b 表面，剩余的表面绝热，a 表面和 b 表面相对于环境的温度经过测量分别为 T_{a} 和 T_{b}。如果物理模型材料的热导率为 λ，从 a 表面到 b 表面的长度为 d_x，a 表面和 b 表面的横截面积为 A，则从 a 表面到 b 表面的温度差为

$$T_a - T_b = P \cdot \left(\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d_x}{A}\right) \tag{6-11}$$

其中，对应a表面和b表面间的热阻可以表示为

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d_x}{A} \tag{6-12}$$

另一方面，如图6-19所示，同样的物理模型对热量还有存储的作用，如果热流流入物理模型，那么在一个很短的时间间隔内 $dt = t_2 - t_1$，能量变化为

$$dQ = P dt = C_{th}(T_2 - T_1) \tag{6-13}$$

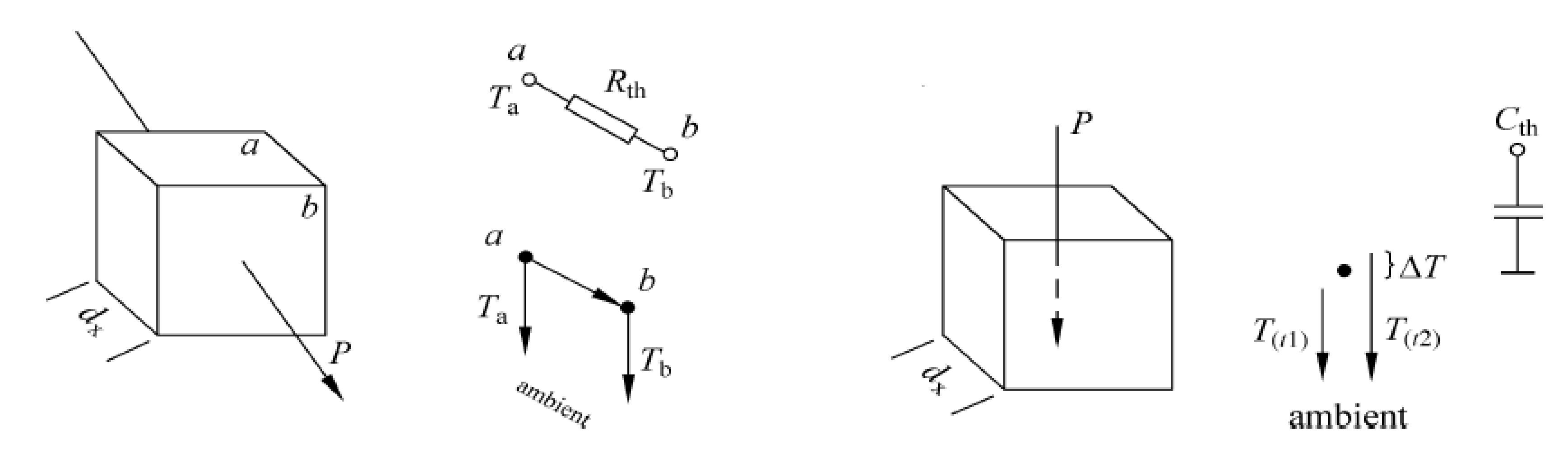


图6-18 热流流过简单的物理模型 **图6-19 热流流入简单的物理模型**

其中，$T_1 = T(t_1)$ 是在 t_1 时刻测量的温度值，$T_2 = T(t_2)$ 是在 t_2 时刻测量的温度值。因为 T_1 和 T_2 测量的温度值是相对于环境温度测量得到的，因此上面公式中定义的热容 C_{th} 是物理模型材料对环境的热容。通过物理模型材料属性的参数，热容 C_{th} 还可以表示为

$$C_{th} = c \cdot m = c \cdot \rho \cdot d_x \cdot A \quad 或者 \quad C_{th} = C_V \cdot V = C_V \cdot d_x \cdot A \tag{6-14}$$

其中，c 是比热；m 是质量；ρ 是密度；C_V 是定容比热容。

在实际的情况中，热流路径可以具有各种的形状，是十分复杂的，比如一个很小的半导体器件在一个散热器的顶部，则热流路径会呈圆锥形分布。在大多数情况下，可以在同一等温面、垂直于热流路径上的材料做适当的分割，切成上述的简单的物理模型。这些小的简单的物理模型非常薄，但不一定总是具有很小的横截面积，并且表面不一定是平面，如图6-20所示。

下面做进一步的分析，如图6-21所示：假设一个材质均匀一致的铜棒，横截面积为 $1\times1(\text{mm})^2$、长度为100mm，它的热导率 $\lambda = 402\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$，定容比热容 $C_V = 386\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$。

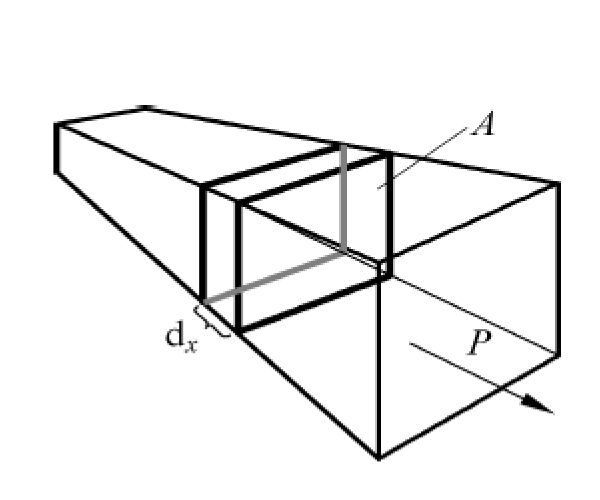


图6-20 散热路径上被分割的一个小的简单的物理模型

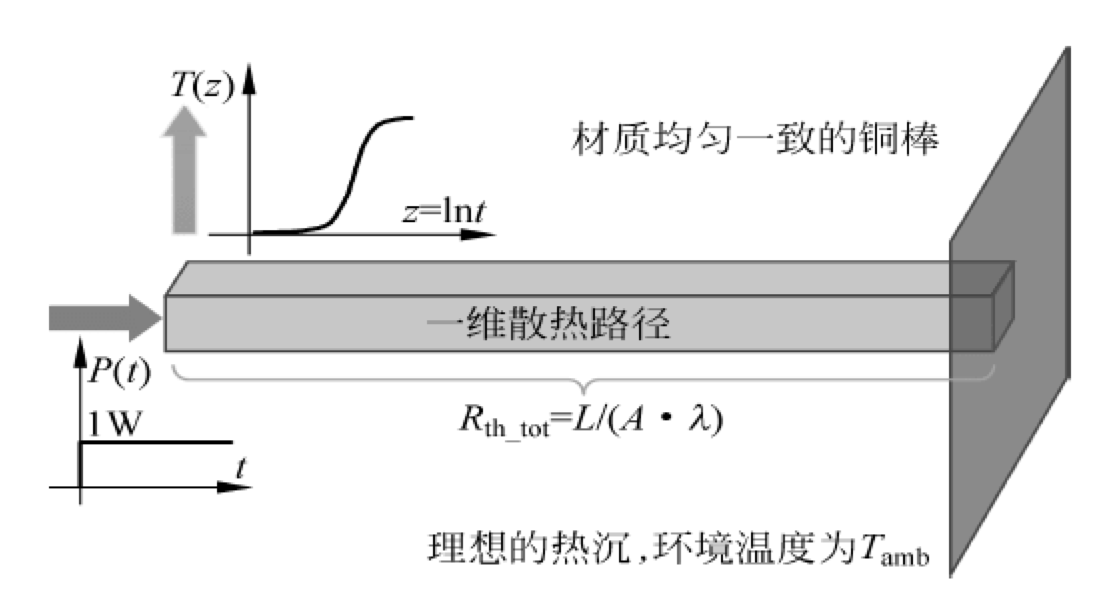


图6-21 材质均匀一致的铜棒

通过计算可知此铜棒的热阻为

$$R_{th} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{d_x}{A} \approx 250\text{K/W}$$

可以将铜棒考虑成很多个简单的物理模型在散热路径上的组合，如图 6-22 所示。

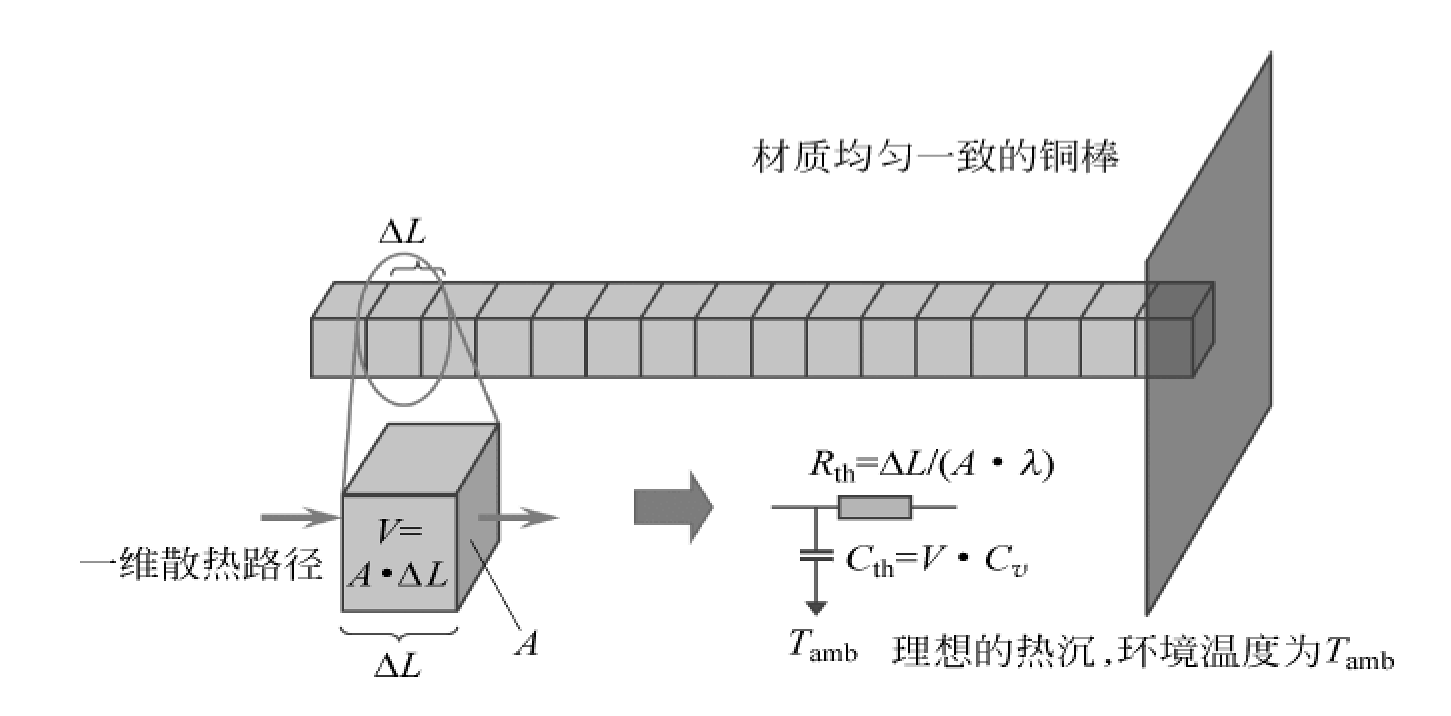


图 6-22　将铜棒考虑成一系列简单的物理模型在散热路径上的组合

其中每一个简单的物理模型的热阻和热容，分别表示为

$$R_{th} = \frac{\Delta L}{A \cdot \lambda} \quad 以及 \quad C_{th} = C_V \cdot \Delta L \cdot A$$

如果此时在铜棒的左侧施加功率密度均匀的加热功率，右侧连接空气，且环境温度为 T_{amb}，其余四面均绝热，则此时铜棒的散热路径可以用一组串联的 RC 网络模型表示，如图 6-23 所示。

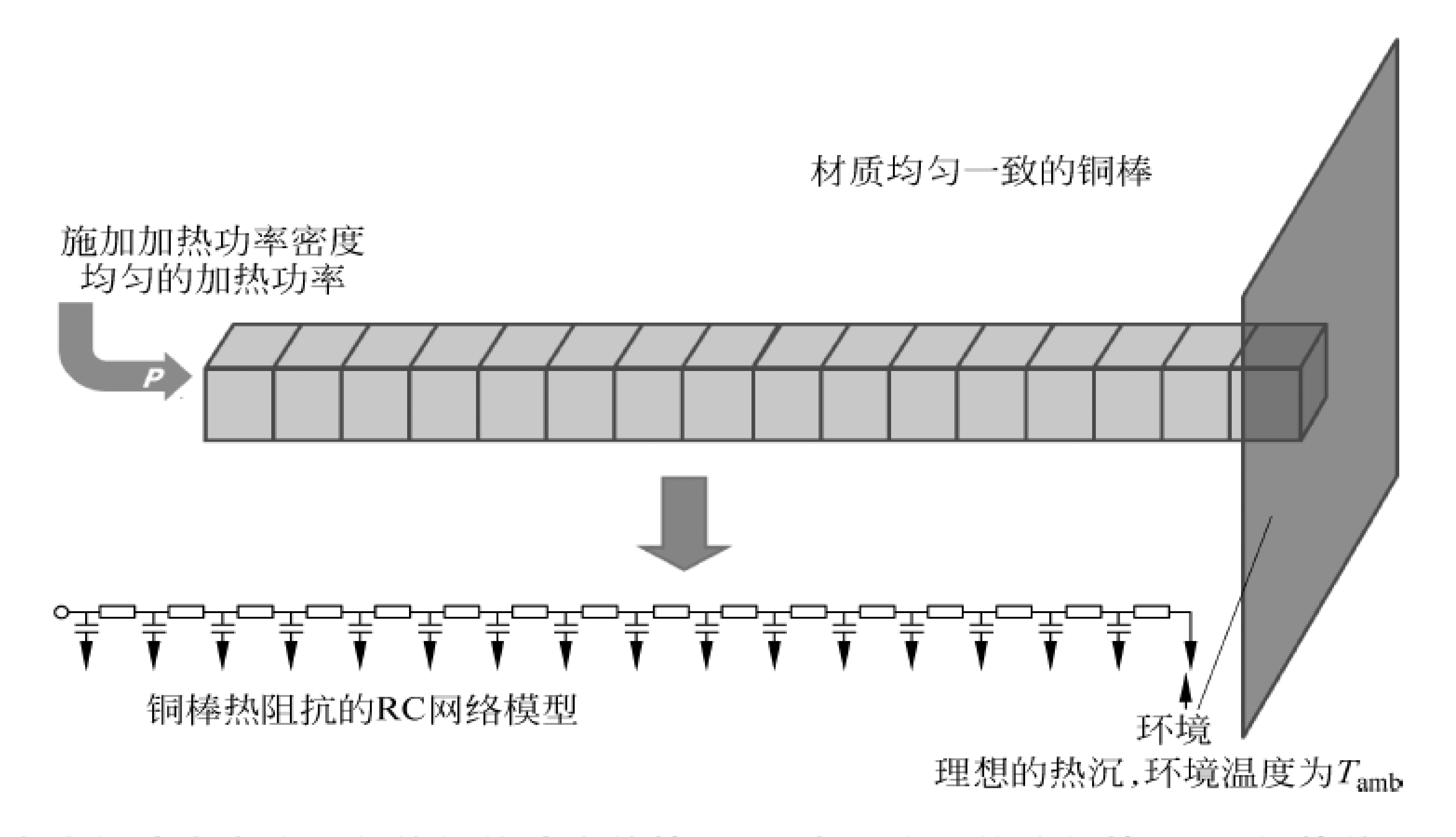


图 6-23　当施加功率密度均匀的加热功率的情况下，在一维散热路径情况下，铜棒的 RC 网络模型

现在假设所有的参数通过设置，可以使简单的物理模型中的热阻和热容都等于 1，那么积分结构函数曲线很容易获得，它是一条直线。同样微分结构函数曲线也很容易的获得，并且也是一条直线，如图 6-24 所示。模型中的热阻和热容都等于 1，积分结构曲线是

一条 $y=x$ 的直线，当热量到达铜棒终端的时候，会出现拐点，拐点的位置给出了散热路径的热阻值。

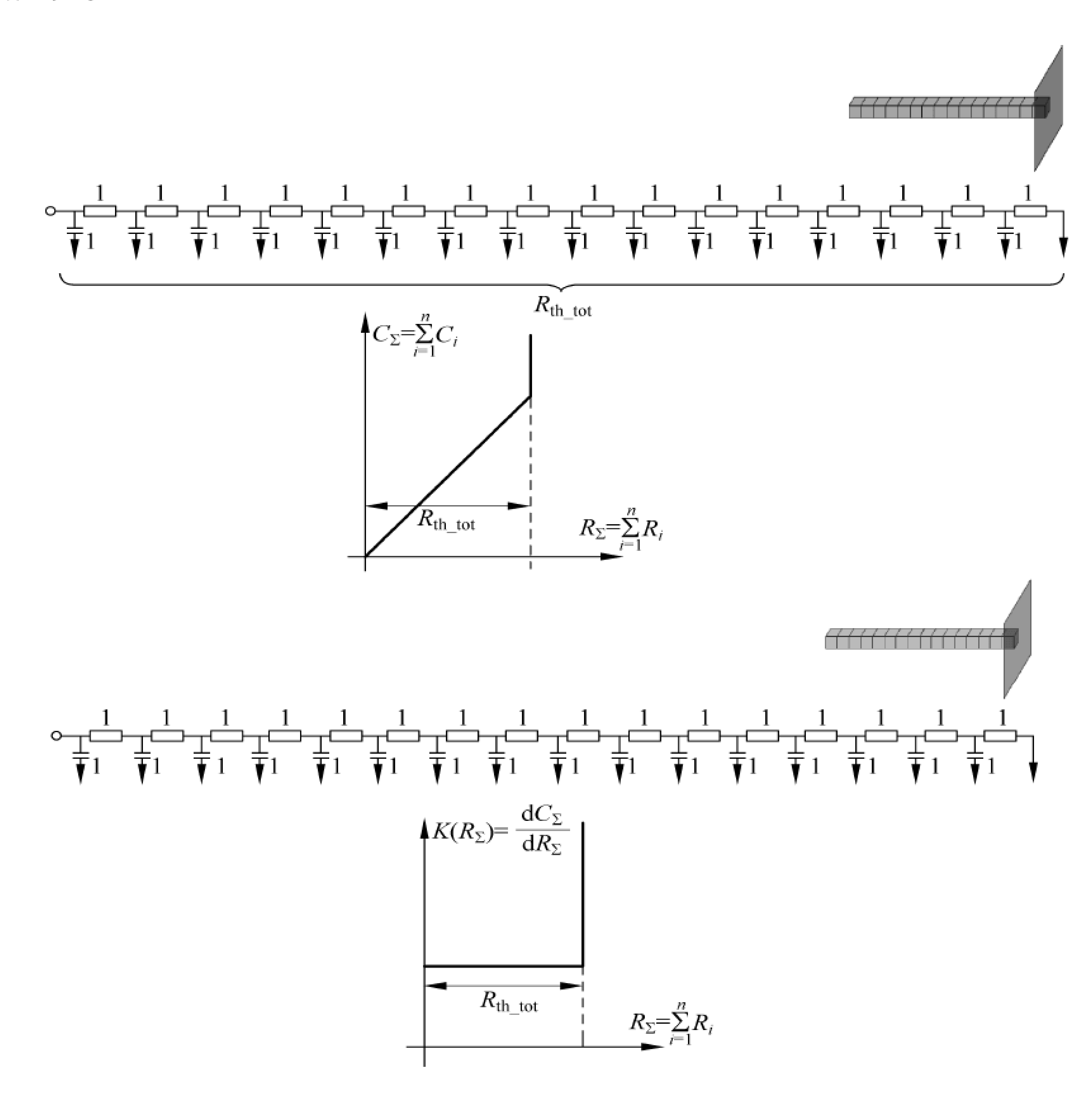


图 6-24 热阻和热容都等于 1 时，铜棒的积分结构函数曲线和微分结构函数曲线

假设铜棒中某些简单的物理模型的热容值变为 2，则积分结构函数和微分结构函数发生如图 6-25 所示的变化。

假设铜棒中某些简单的物理模型的体积变为原来的 2 倍，则相应的热容值也变为 2，积分结构函数和微分结构函数发生图 6-26 所示的变化。

通过以上分析可知，当结构函数曲线出现拐点，发生变化时，意味着散热路径上材料的属性发生了变化或者散热路径上的几何尺寸发生变化，或者两者都发生了变化。不论哪种情况，当散热路径发生变化时，结构函数曲线都可以很好的将这些变化直观的表现出来，进而可以对散热路径的结构进行分析。

通过积分结构函数和微分结构函数可以读出散热路径上各个部分的热阻值和热容值，如图 6-27 所示。

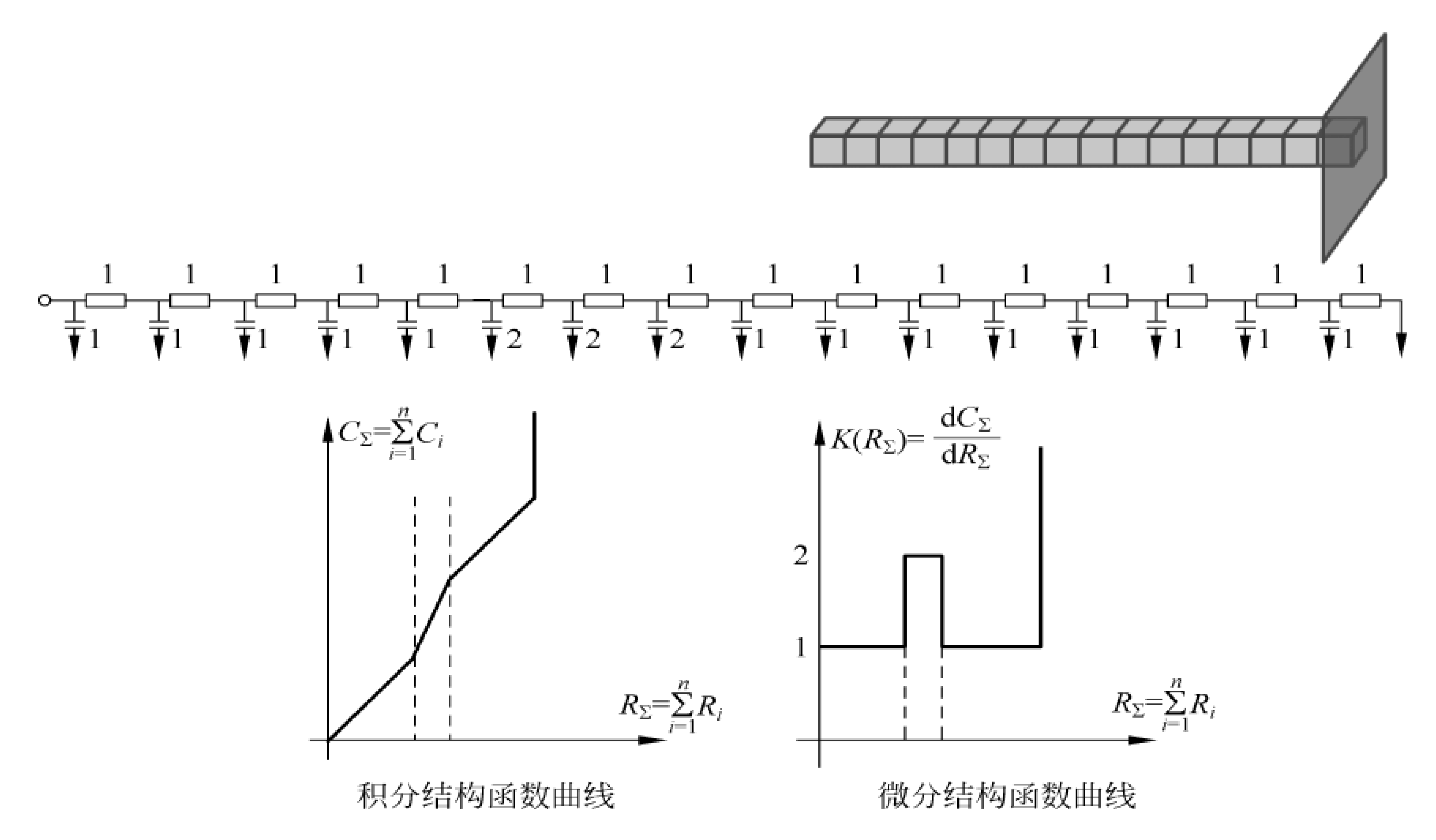


图 6-25　某些物理模型的热容值变为 2，铜棒的积分结构函数曲线和微分结构函数曲线

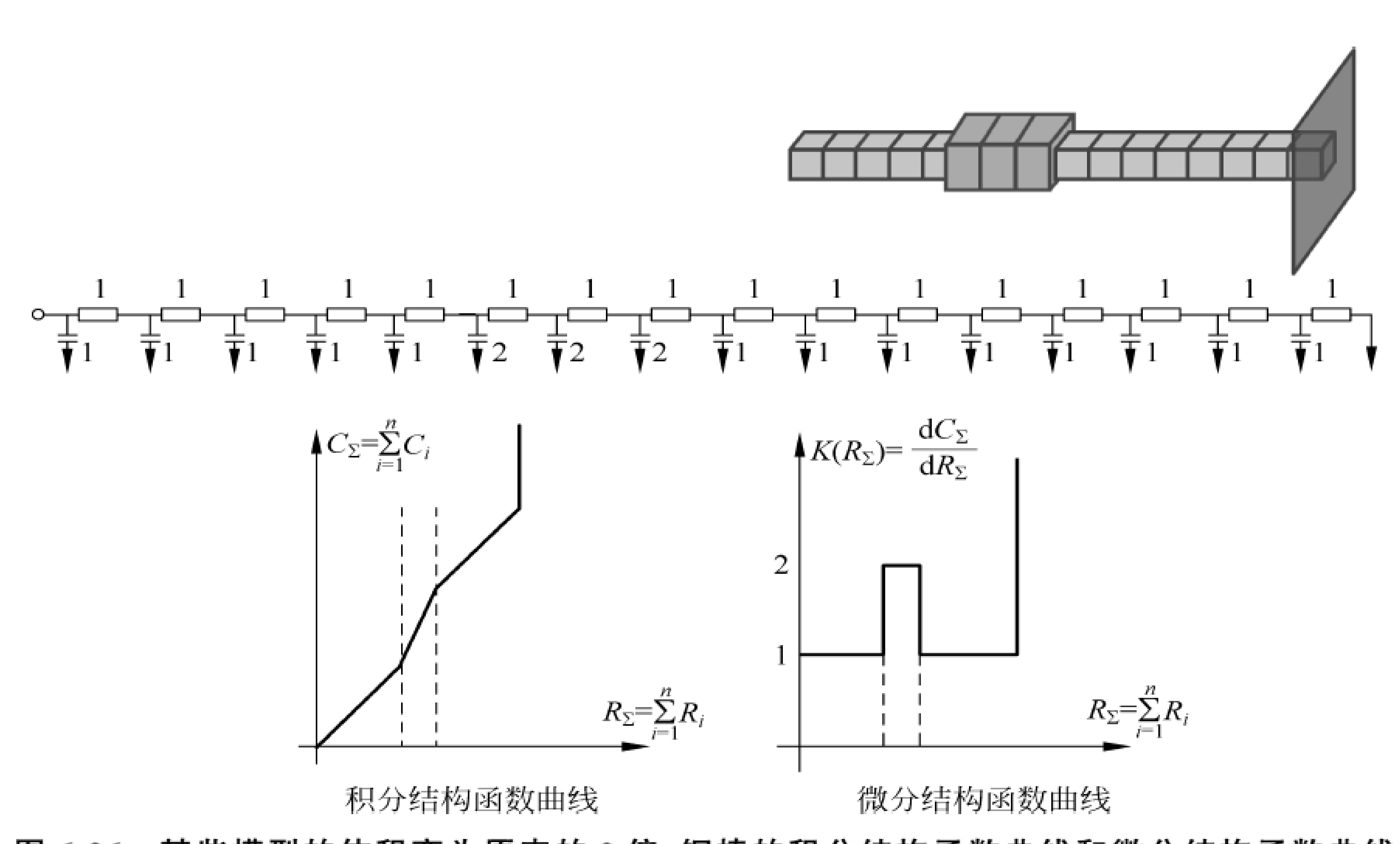


图 6-26　某些模型的体积变为原来的 2 倍，铜棒的积分结构函数曲线和微分结构函数曲线

由于存在以下关系：

$$C_{th} = C_V \cdot V \tag{6-15}$$

所以，在积分结构函数曲线上，如果某些部分的材料已知，则这些材料的 C_V 定容比热容已知，因此可以得到材料的体积；如果某些部分材料的体积已知，则这些材料的定容比热容可以获得。

并且由于：

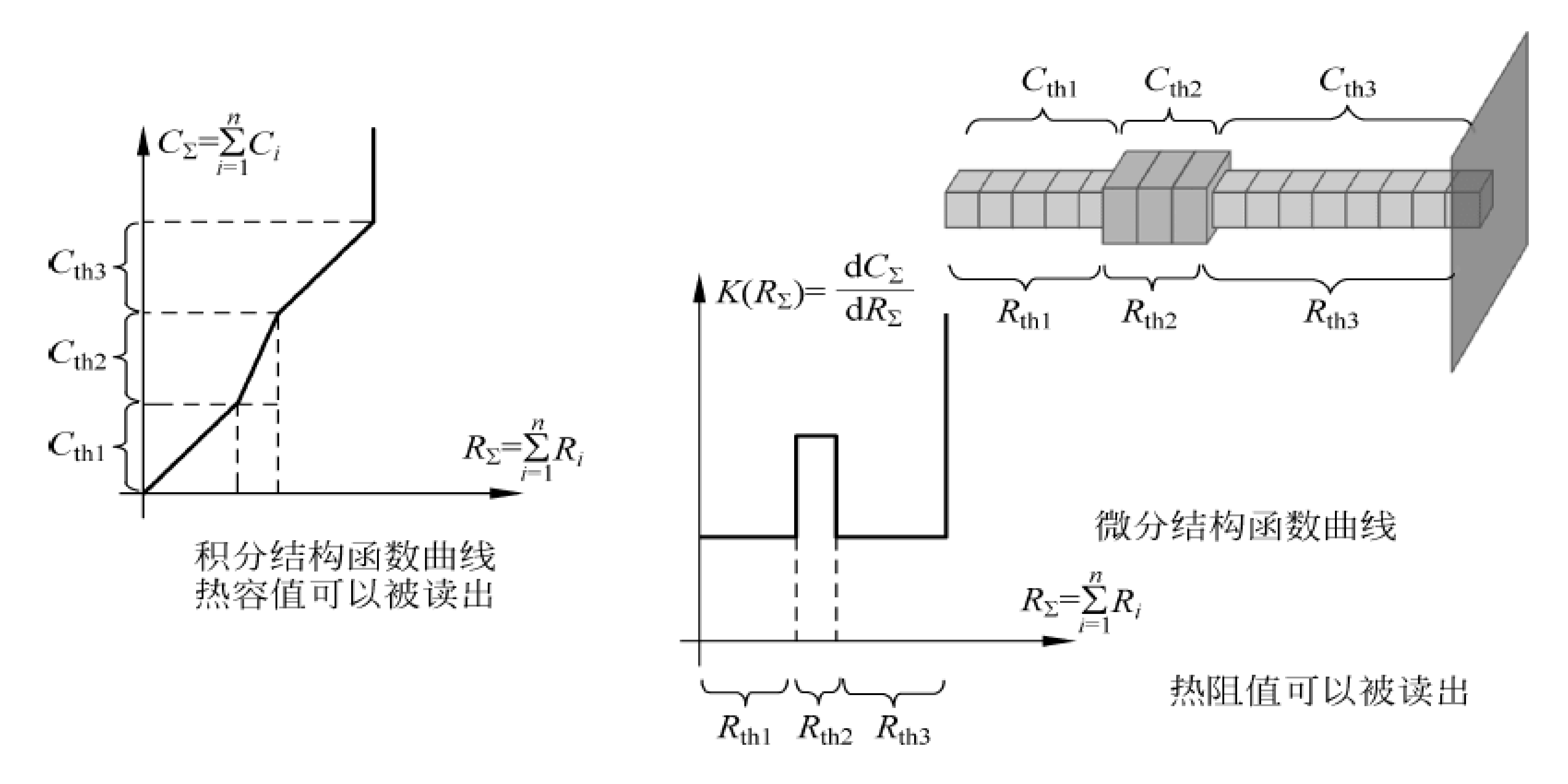


图 6-27　通过结构函数曲线得到各个部分的热容值和热阻值

$$\frac{\mathrm{d}C_{\mathrm{th}}}{\mathrm{d}R_{\mathrm{th}}}=\frac{C_V\cdot d_x\cdot A}{\frac{1}{\lambda}\cdot\frac{d_x}{A}}=C_V\cdot\lambda\cdot A^2 \tag{6-16}$$

所以在微分结构函数曲线上，如果某些部分的材料已知，则这些材料的定容比热容 C_V 和热导率 λ 则可知，因此可以得到材料的横截面积；如果某些部分材料的横截面积已知，则这些材料的属性定容比热容和热导率的乘积可以得到，如图 6-28 所示。

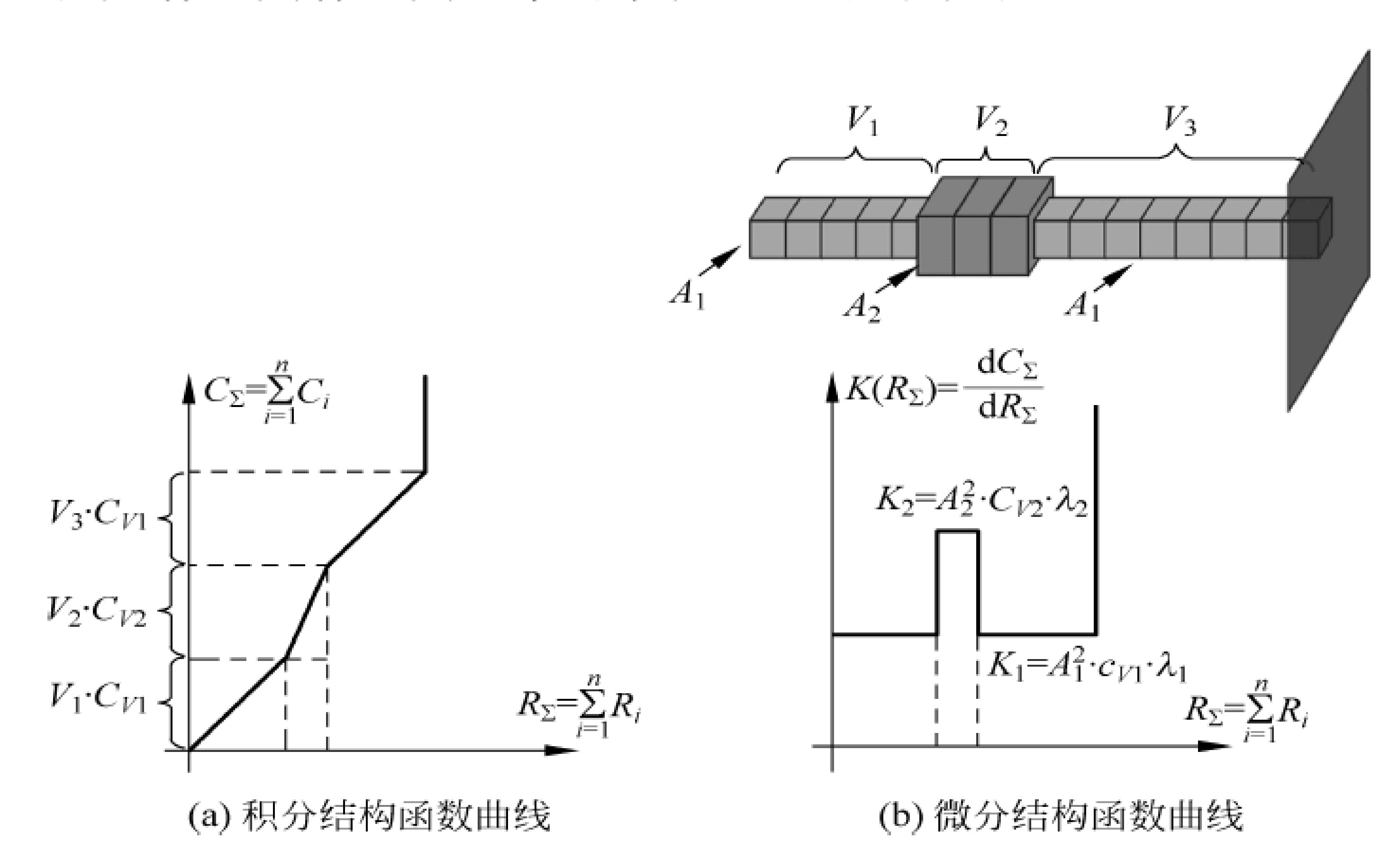


图 6-28　结构函数曲线上，材料属性参数和几何尺寸的关系

在积分结构函数曲线中，如果材料属性已知，则相应体积可以得到；如果体积已知，则相应的定容比热容可以得到。

在微分结构函数曲线中，如果材料属性已知，则相应的横截面积可以得到；如果横截面积已知，则相应的材料属性定容比热容和热导率的乘积可以得到。

现在对此铜棒做一些变化，从左侧开始的长度为 40mm 的铜棒材料的 C_V 定容比热容保持不变，中间长度为 20mm 的铜棒材料的 C_V 定容比热容为原来的两倍，最后长度

40mm 的铜棒材料的 C_V 定容比热容保持不变，则此时铜棒散热路径的结构函数与改变前的结构函数曲线的对比，如图 6-29 所示。

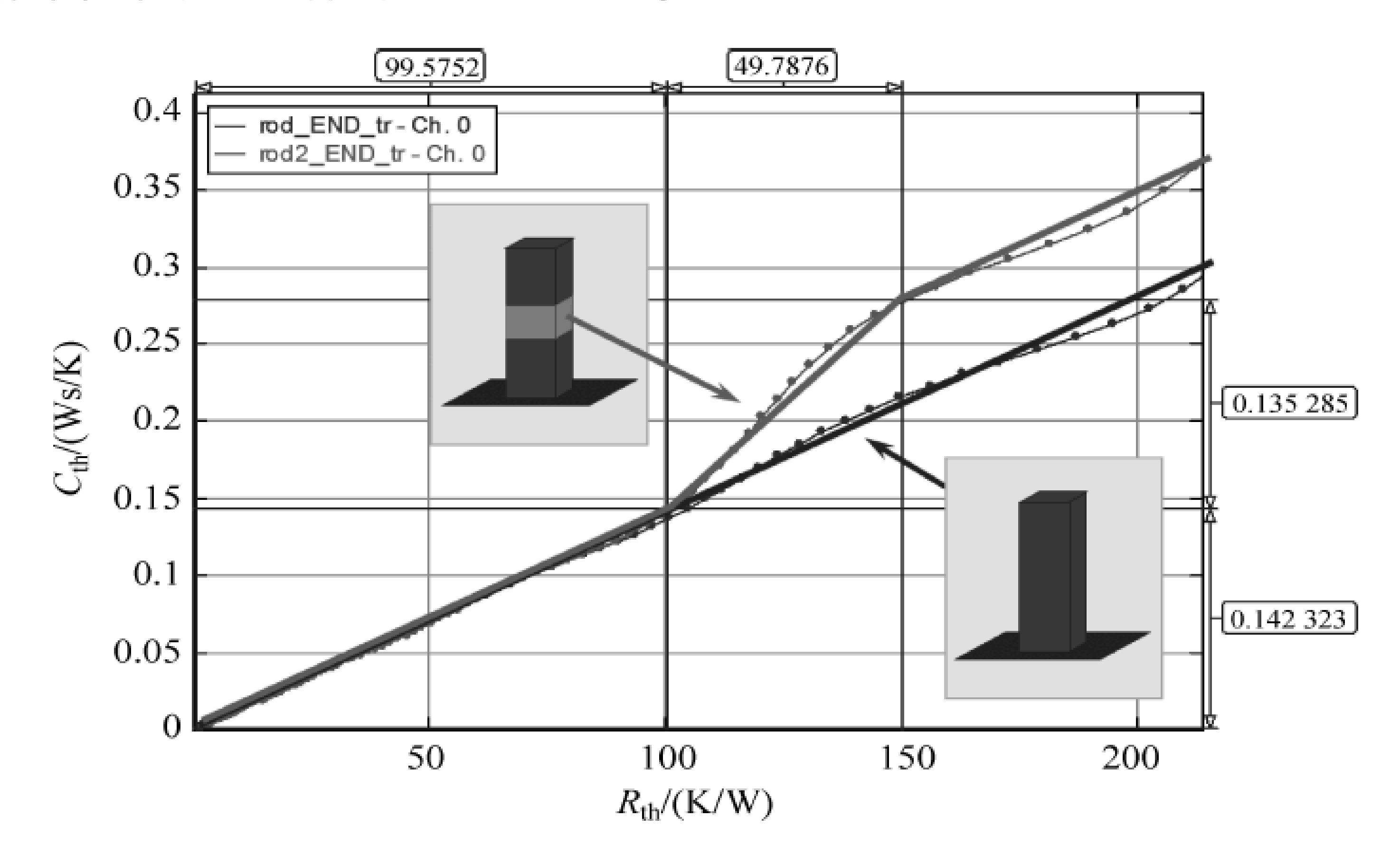


图 6-29　中间部分铜棒材料属性改变后的结构函数曲线的对比

如果此时不使用结构函数曲线，只使用瞬态热阻抗曲线进行对比，则很难区分出这些变化，如图 6-30 所示。

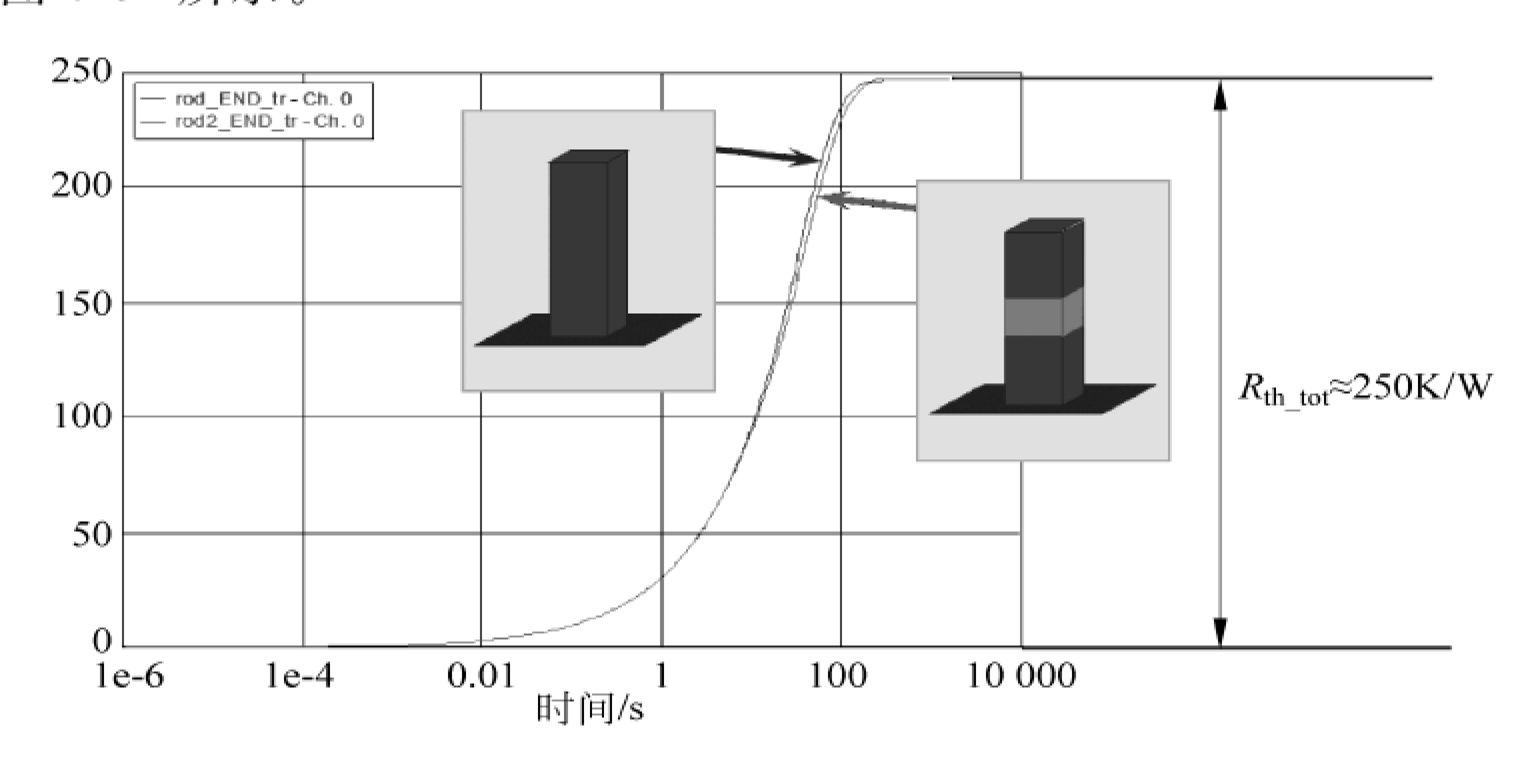


图 6-30　中间部分铜棒材料属性改变后的瞬态热阻抗曲线的对比

从图 6-29 和图 6-30 的对比可知，结构函数可以很好地显示出散热路径上的变化，是对散热路径很好的分析工具和手段。如果只使用瞬态热阻抗曲线进行分析，则很难判断散热路径发生了变化。

3. 结构函数的推导

对被测半导体器件进行瞬态热测试后，可以得到瞬态热测试的原始曲线，据此可以得到瞬态热阻抗 Z_{th} 曲线，计算公式如下：

$$Z_{th}(t) = \frac{[T_{J0} - T_J(t)]}{\Delta P_H} \tag{6-17}$$

在得到了瞬态热阻抗曲线 Z_{th} 后，可以通过数学手段得到结构函数曲线。

根据 JEDEC 组织 JESD51-14 的规定，结构函数曲线的推导，首先基于以下的前提：

(1) 热学系统可以通过热阻和热容的 RC 网络模型来代表，并且，此 RC 网络模型是线性的、被动的；

(2) 驱动点的表现被深入研究；

(3) 本质上可以假设为一维散热路径。

其中：

(1) 线性系统意味着热阻和热容独立于温度存在、不依赖于温度本身。即热导率和热容是恒定值，不具温度依赖性。在实际应用中，这是一个合理的假设，虽然在真实情况中并不存在这种情况；

(2) 驱动点的表现意味着：结构中相同位置被加热，并测量其温度响应，LED 器件属于这种类型；

(3) 本质上可以假设为一维散热路径意味着：除了热量沿着径向传递，包括一些更复杂的情况，比如放置在 MCPCB 上的 LED 器件，它的热流路径呈现圆锥形分布。所谓本质上的一维散热路径可以认为是以上一维散热路径的“串联”；

(4) 对于通过散热路径耗散的热量来讲，散热路径中的每一种材料都对热量存在着两种作用：一种是热学容纳，也就是热容 C_{th}；一种是热学阻碍，也就是热阻 R_{th}。热学系统是分布的线性 RC 系统，因此可以用 RC 网络模型来代表。

现在假设一个非常简单的半导体器件，拥有一维散热路径，它的散热路径上只有一种材料，则它的散热路径可以通过 RC 网络模型表示为如图 6-31 所示。

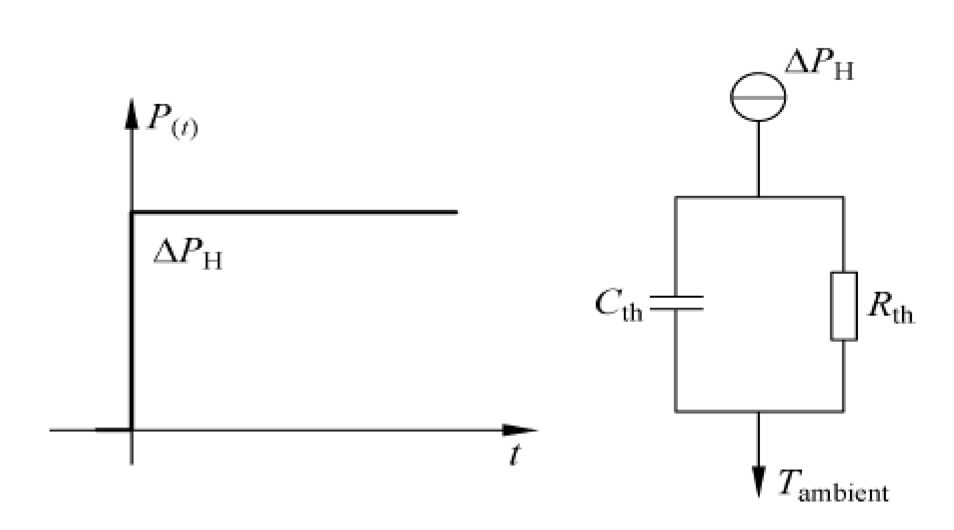


图 6-31 简单半导体器件散热路径的 RC 网络模型

对于这个简单的半导体器件，热学模型非常简单，包括一个热阻和一个热容。简单的半导体器件可以用 RC 网络模型来表示。此时，对这个被测半导体器件施加阶跃加热功率 ΔP_H，则此被测半导体器件的结温将发生如下的变化：

$$\Delta T(t) = \Delta P_H \cdot R_{th} \cdot [1 - e^{-\frac{t}{\tau}}] \tag{6-18}$$

其中，

$$\tau = R_{th} \cdot C_{th} \tag{6-19}$$

结温变化曲线如图 6-32 所示。

图中被测半导体器件的结温变化曲线就是瞬态热测试的原始曲线，通过瞬态热测试可以直接得到，是已知的。

公式(6-18)中各物理量的意义如下：

(1) $T(t)$是瞬态热测试的原始曲线，可以通过测试直接获得；

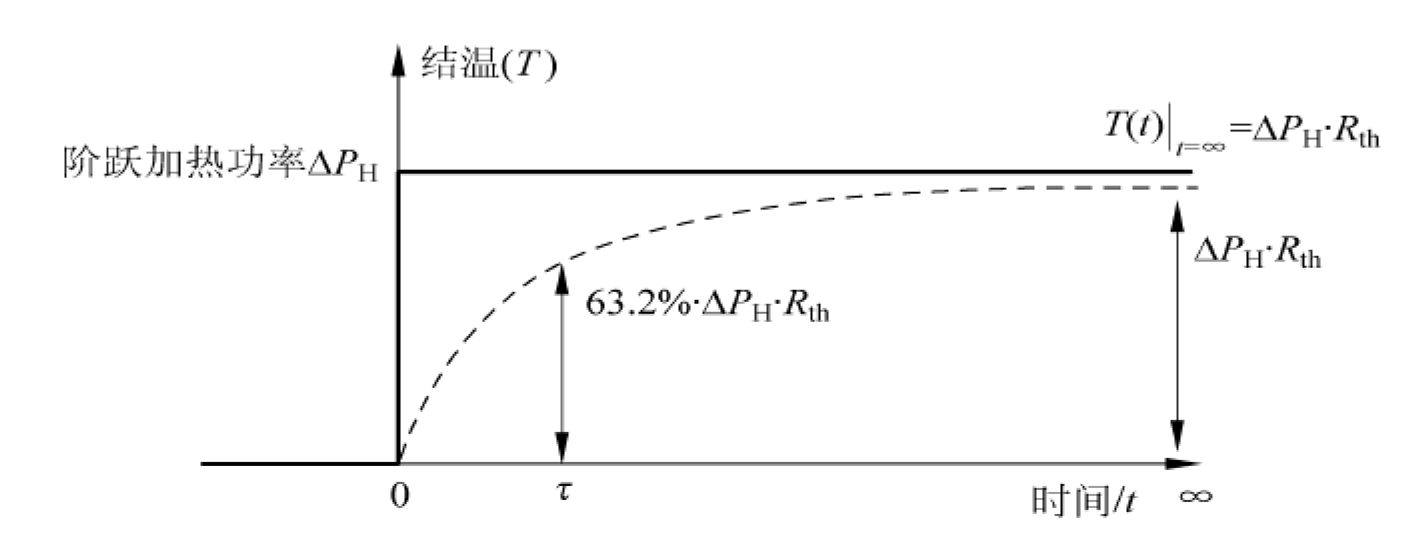


图 6-32　施加阶跃加热功率后，简单的半导体器件的结温变化曲线(响应曲线)

(2) 因为施加的加热电流为已知输入量，在被测器件上产生的正向电压经过测量可以获得，因此施加在被测半导体器件的加热功率可以计算获得；

(3) 通过瞬态热测试的原始曲线获知相对于环境温度的结温变化范围，因此可由公式

$$R_{th} = \frac{\Delta T}{\Delta P_H} \tag{6-20}$$

计算出被测半导体器件的热阻 R_{th}；

(4) 在瞬态热测试的原始曲线中，结温度变化达到最终热平衡时温度的 63.2% 处的时间为此 RC 网络模型的时间常数，时间常数的重要特征是：时间常数只取决于物理特性(热阻与热容)，并不取决于输入功率和温度。时间常数可以在瞬态热测试的原始曲线中得到，如图 6-33 所示；

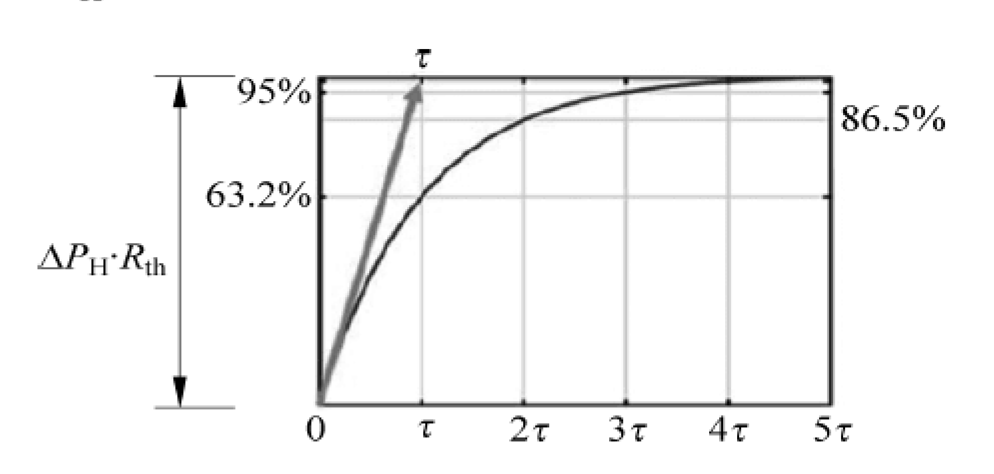


图 6-33　时间常数的获得

(5) 在获得 $T(t)$ 瞬态热测试的原始曲线后，也可以计算出热容 C_{th}：

$$C_{th} = \frac{\tau}{R_{th}} \tag{6-21}$$

当通过瞬态热测试获得简单的半导体器件的热阻和热容后，实际上这个简单的半导体器件的散热路径就已经分析出来了。因此简单的半导体器件的 RC 网络模型完全可以用时间常数 τ、描绘幅值的 R_{th} 来表征，可以用图 6-34 来表示。

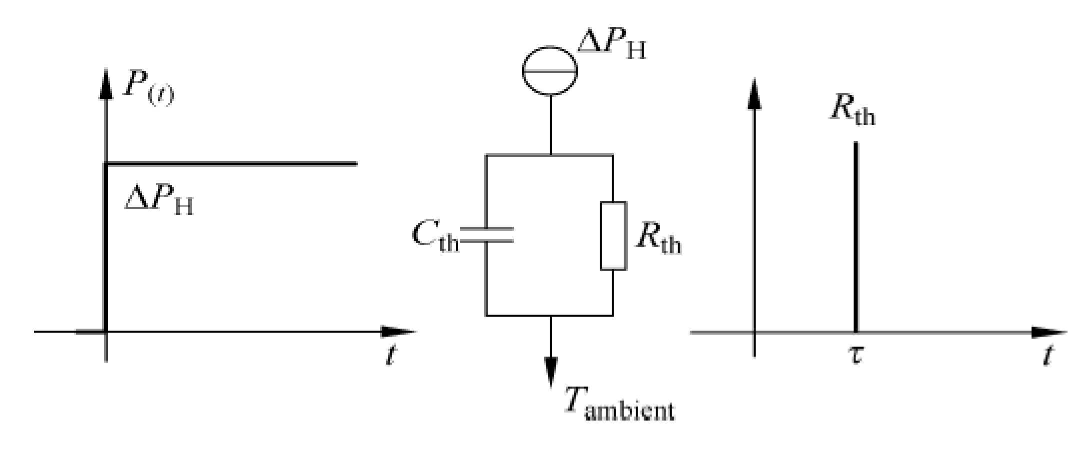


图 6-34　RC 网络模型的时间常数的表征

在实际的工况中，被测半导体器件的物理结构更加复杂，可以用 RC 网络的串联来表示，它包含了几个时间常数，如图 6-35 所示。

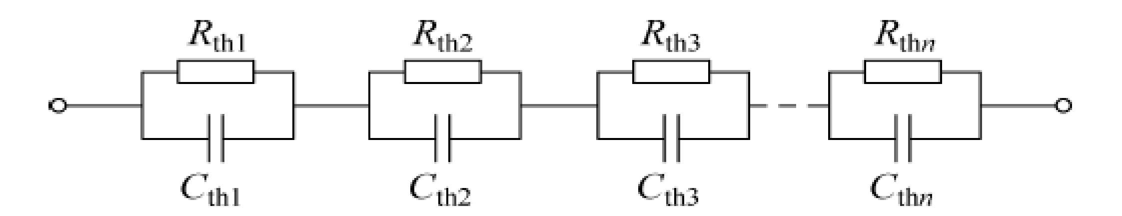


图 6-35　用 RC 网络进行串联来表示的热学模型

在这种情况下，结温变化可以用以下的公式表示：

$$\Delta T(t) = \sum_{i=1}^{n} \Delta P_{H} \cdot R_{th} \cdot [1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}] \tag{6-22}$$

这个被测半导体器件对应散热路径的物理结构可以用 n 对 R_{thi} 和 τ_{thi} 来表示，当每一对 R_{thi} 和 τ_{thi} 都获得后，通过 $C_{thi}=\tau_{thi}/R_{thi}$ 可以计算出热容 C_{thi}。当每一对 R_{thi} 和 C_{thi} 都获得后，则此半导体器件对应散热路径的物理结构为已知。

表示半导体器件物理结构的 R_{thi} 和 τ_{thi} 可以用图 6-36 来表示，图中沿水平轴垂直线的位置对应于时间常数，而它们幅值的高度与 R_{thi} 成比例关系。这个图是离散的，表示了在响应中的时间常数和它们的幅值的高度。

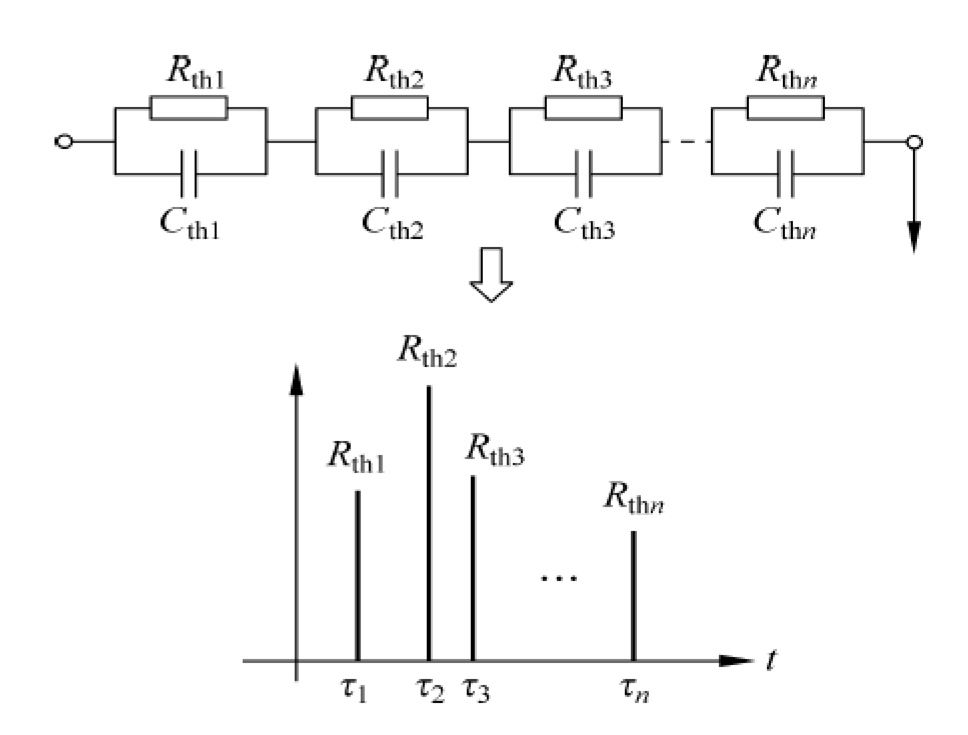


图 6-36　用离散的时间常数表征半导体器件的物理结构

真实的半导体器件作为热学系统，是分布式的线性 RC 系统，串联起来的 RC 模型的数目应该是无限的，因此离散的时间常数的数值，应该用连续的时间常数谱来表示，如图 6-37 所示。

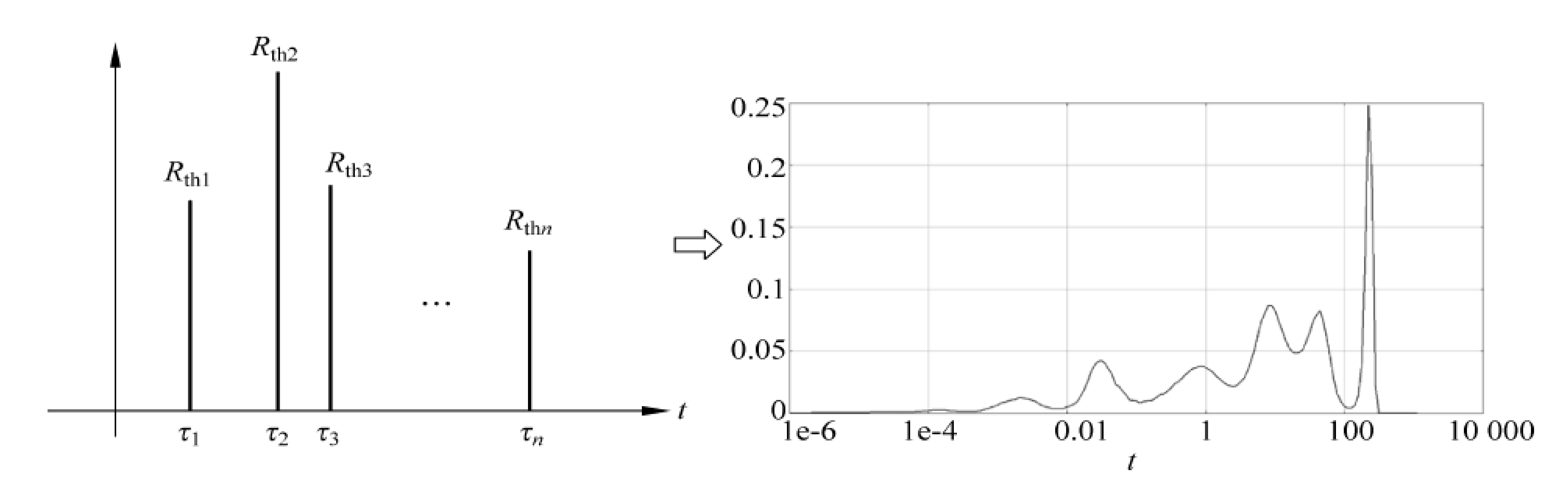


图 6-37　用时间常数谱表示离散的时间常数的数值

此时，半导体器件结温的变化可以表示如下：

$$\Delta T = \int_0^{\infty} \Delta P_{\mathrm{H}} \cdot R(\tau)[1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}]\mathrm{d}\tau \tag{6-23}$$

如果此时输入单位阶跃功率1W，则上面公式变为

$$a(t) = \int_0^{\infty} R(\tau)[1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}]\mathrm{d}\tau \tag{6-24}$$

其中，$R(\tau)$为时间常数谱，可以用来表征整个分布式系统，如果知道了$R(\tau)$时间常数谱，也就知道了整个热学系统结构。

在实际的半导体器件中，从热源开始的散热路径的时间常数分布顺序如下：

(1) 半导体芯片(Die)：大约100μs～10ms；

(2) 半导体芯片下边结构(Die Attach)：10～50ms；

(3) 封装的远端结构：50ms～1s；

(4) 封装体本身：1～10s；

(5) 冷却组件(散热器、水冷板等)：10～10 000s。

在实际的半导体器件中，散热器的时间常数可达数千秒到上万秒，特别是一些具有比较大散热器的热学系统。因此大范围的时间常数，在瞬态热测试和仿真分析中，产生了数据采集的问题。为了获得具有较小时间常数的材料的信息，瞬态热测试设备必须具备比较高的采样速率，并且加热电流和测试电流的切换速度要快于最小的时间常数。这也要求在瞬态热测试中，测量必须在加热电流和测试电流的切换后1μs开始进行。

因为线性时间轴表示的瞬态温度变化以等间距分布在全时域上，如果用线性时间轴表示瞬态热测试的原始曲线，在开始测量阶段由于被测半导体器件封装内部材料的时间常数较小，因此测量采样点辨识不清。采用对数时间轴则可将瞬态热测试原始曲线的前端放大进行分析，如图6-38所示。

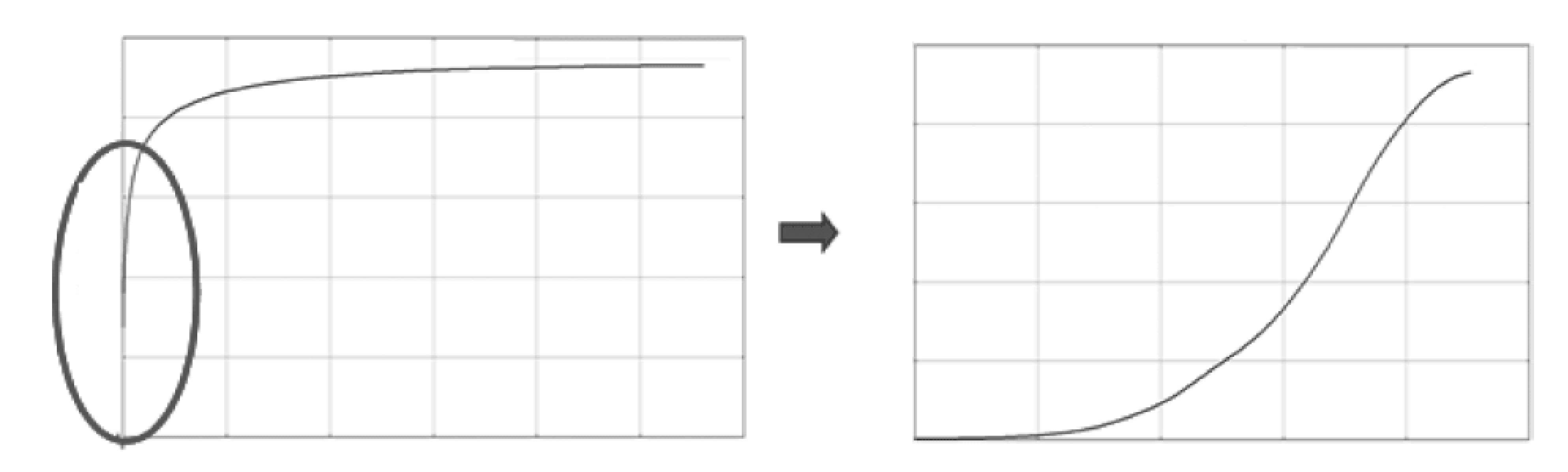


图6-38 将瞬态热测试曲线的时间轴从线性时间轴变为对数时间轴后的对比

在将瞬态热测试原始曲线从线性时间轴变为对数时间轴后，在结温变化的表达式中，需要使用$a(z)$来代替$a(t)$进行表示，其中$Z=\ln(t)$，使用$a(z)$表示的结温变化公式如下：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}a(z) = \int_0^{\infty} R(\zeta)[\exp(z - \zeta - \exp(z - \zeta))]\mathrm{d}\zeta \tag{6-25a}$$

这是一个卷积的形式，现在导入：

$$W_z(z) = \exp(z - \exp(z)) \tag{6-25b}$$

则上面公式可以表示为：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}a(z) = R(z) \otimes W_z(z) \tag{6-25c}$$

则可以得到 $R(z)$时间常数谱函数为：

$$R(z) = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}z}a(z) \otimes^{-1} W_z(z) \tag{6-25d}$$

在 JEDEC 组织 JESD51-14 的规定中，为了获得比较精确的时间常数谱，需要考虑到以下几个因素：

（1）瞬态热测试的原始曲线 $a(z)$无噪音影响，而且必须具有很高的采样时间分辨率；

（2）除了数据采集时无噪音影响外，同样在获得时间常数谱 $R(z)$的计算过程中，也必须无噪音的影响；

（3）数值上的反卷积的计算过程是基于贝叶斯迭代算法，迭代数目越高，时间常数谱 $R(z)$的细节越清楚，但是受噪音的影响也就越大；

（4）通过时间常数谱 $R(z)$可以进一步获得被测半导体器件的物理结构，也就是结构函数曲线。

时间常数谱 $R(z)$表示的时间常数是无限多的，为了计算处理的方便，对得到的连续的时间常数谱进行离散化处理，时间常数谱 $R(z)$被离散化成 150～200 个离散的峰值后进行处理。每一个离散后的峰值表征一对时间常数 τ 和热阻 R_{th}，如图 6-39 所示。从时间常数 τ 和热阻 R_{th}，相对应的热容值 C_{th}就可以被计算出来。

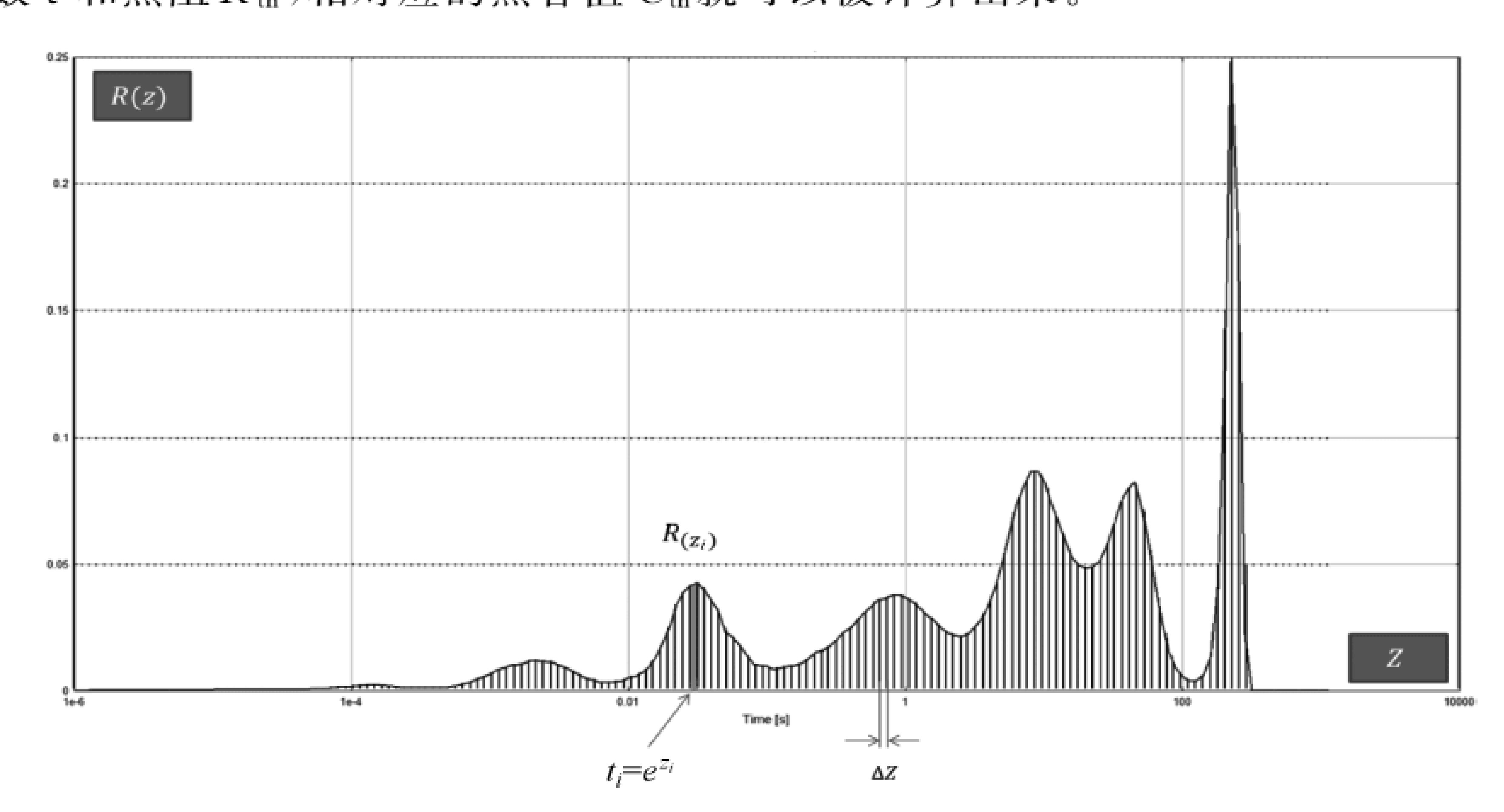


图 6-39　离散化后的时间常数谱，每一个峰值对应一对热阻和热容

其中：

$$R_{\mathrm{th}i} = R(z_i) \cdot \Delta Z \tag{6-26a}$$

因为：

$$t_i = \mathrm{e}^{z_i} \tag{6-26b}$$

可知：

$$C_{\mathrm{th}i}=\frac{t_i}{R_{\mathrm{th}i}}=\frac{\mathrm{e}^{z_i}}{R_{\mathrm{th}i}} \tag{6-26c}$$

得到每一对热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 后，就可以得到此热学系统的 Foster 类型的阻抗模型。Foster 网络模型中每一对热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 并联，并将多个 RC 网络模型串联起来，形成串联的 RC 网络模型。这种获得热学系统物理结构上热阻 R_{th} 和热容 C_{th} 的方法，即是 NID-Network Identification by Deconvolution，即通过反卷积的方法进行网络辨识。

Foster 网络模型是一个非常好的数学模型，如图 6-40 所示，可以获得热学系统的瞬态响应，但是不能被用来表征热学系统的物理结构，因为 Foster 网络模型中的热容是节点到节点的热容，并不真实地反应实际物理结构的热容。

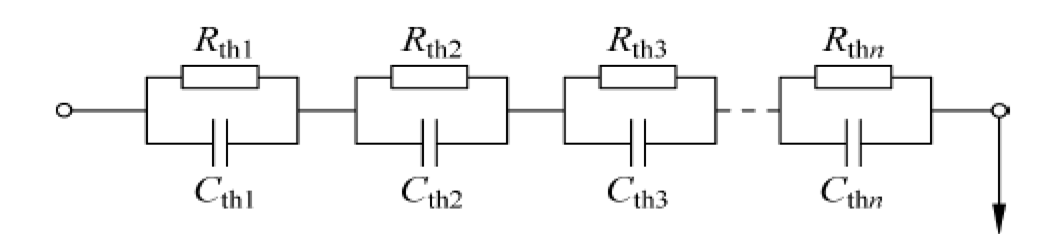


图 6-40　Foster 网络模型

实际工况中的热容是相对于“环境”存在的，如果需要真实反应热学系统中的热容，需要将 Foster 网络模型转换成为 Cauer 网络模型进行分析，如图 6-41 所示。Cauer 网络模型是适合对热学系统物理结构进行分析的模型。

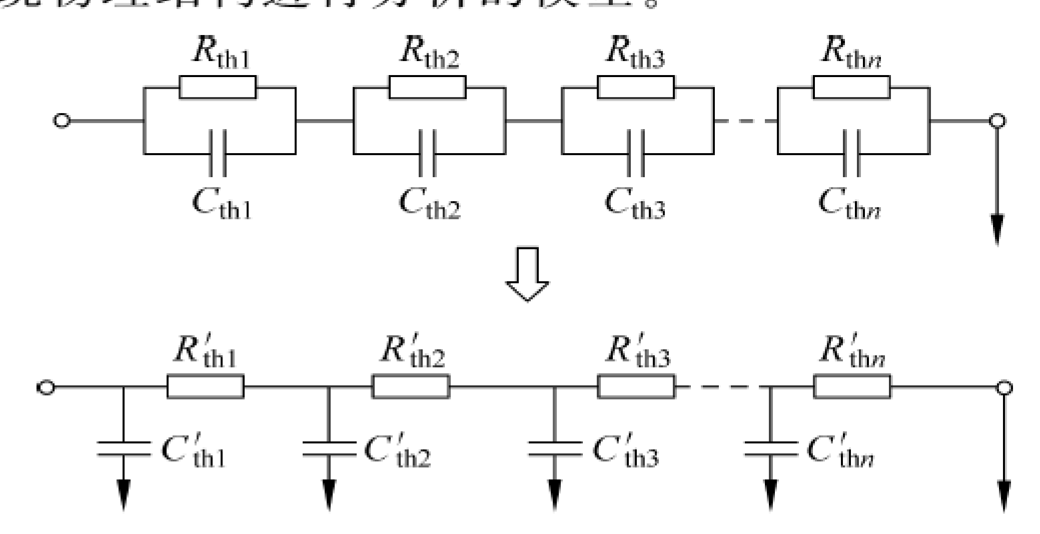


图 6-41　Foster 网络模型变换成 Cauer 网络模型

获得 Cauer 网络模型后，实际上热学系统的物理结构就已经清楚了，但是只分析 Cauer 网络模型，还是很难直观地对物理结构进行表达，因此结构函数就应运而生了，结构函数实际上是 Cauer 网络模型的图形化表达，Cauer 网络模型积分结构函数的表达如图 6-42 所示。

结构函数的 Y 轴是热容，X 轴是热阻，Y 轴热容的累积被作为 X 轴热阻累积的函数进行表达，通过结构函数可以对被测半导体器件的散热路径进行分析。

通过瞬态热测试后得到的结构函数曲线，可以反映从发热源（原点）到环境（最后直线向上部分）的热流路径上的所有热容与热阻分布。根据结构函数上斜率（热容与热阻的比值）变化，可以区分出代表不同材料的线段。用直观的方式，帮助分析散热路径上不同材料的热阻与热容。

积分结构函数曲线是一个很好的图形分析工具，可以用来分析散热路径上的物理结构。在斜率较小的线段部分，热容变化较小，但是热阻变化较大，意味着这些线段部分的物理结构具有低的热导率或者小的横截面面积；在斜率较大的线段部分对应的物理结构

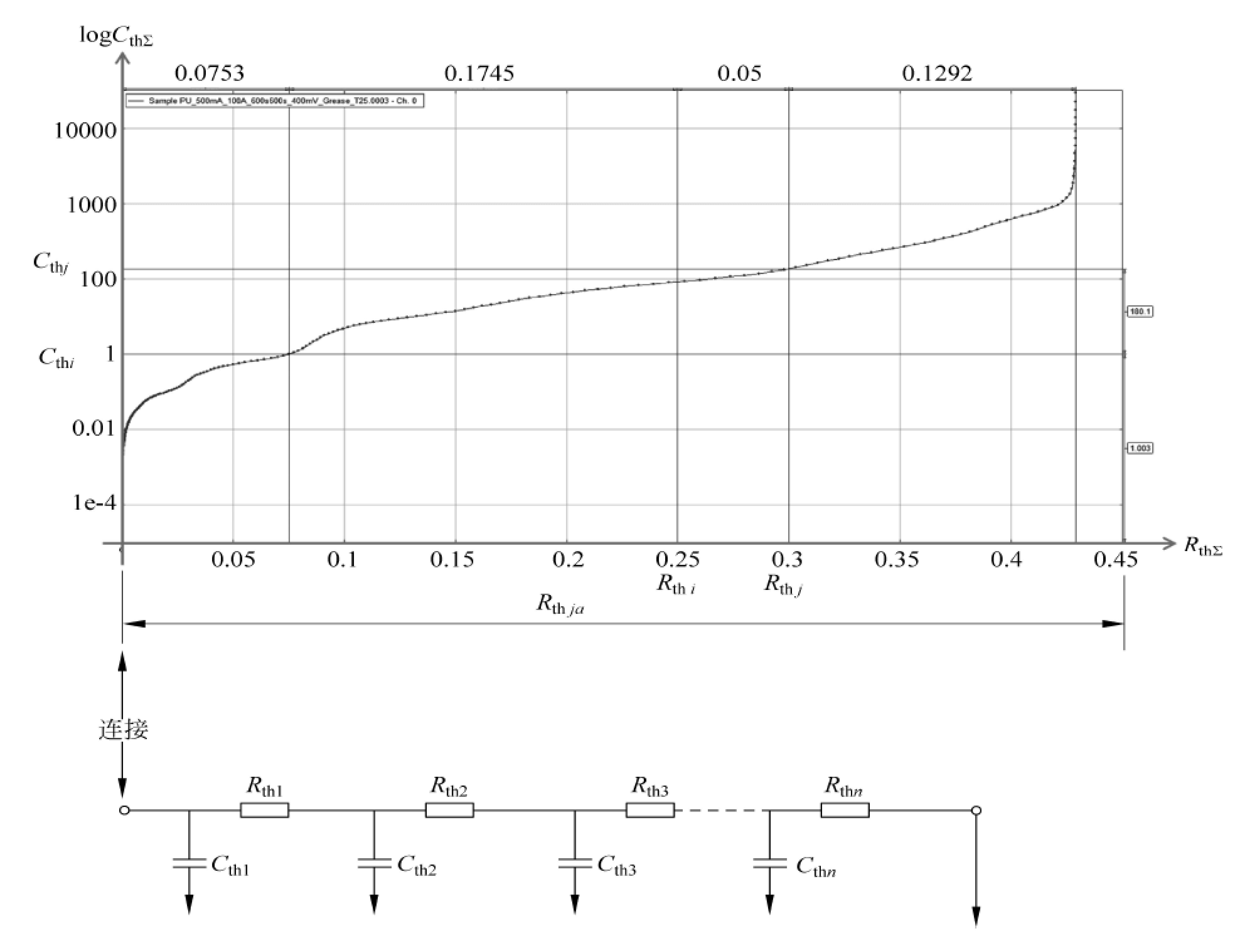


图 6-42 Cauer 网络模型积分结构函数的表达

具有高的热导率或大的横截面面积。当出现拐点时，意味着材料或几何形状发生了变化。通过这样的方式，热阻的数值、热容的数值、几何尺寸、传热系数以及材料参数都能从积分结构函数中直接读取。

为了更好地辨别出拐点，可以将积分结构函数曲线求导，而得到微分结构函数曲线，如图 6-43 所示。在微分结构函数曲线中，尖峰对应着高热导率的部分，例如 Die 或者散热器；而谷底则对应着低热导率的部分，例如 Die Attach 或者空气。

微分结构函数曲线的表达式如公式(6-16)所示，通过微分结构函数曲线可以得到沿散热路径的横截面面积的信息。

6.1.4 LED 器件的电、光、热联合测试平台的实现

按照 JEDEC 组织 JESD51-52 的规定，LED 器件的光、热、电联合测试应该按照以下步骤和要求进行测量：

(1) 把 LED 器件安装在指定测试环境的测试装置上，例如积分球的控温热沉上，其温度可以控制；

(2) 对 LED 器件进行温度敏感参数的测量和校准；

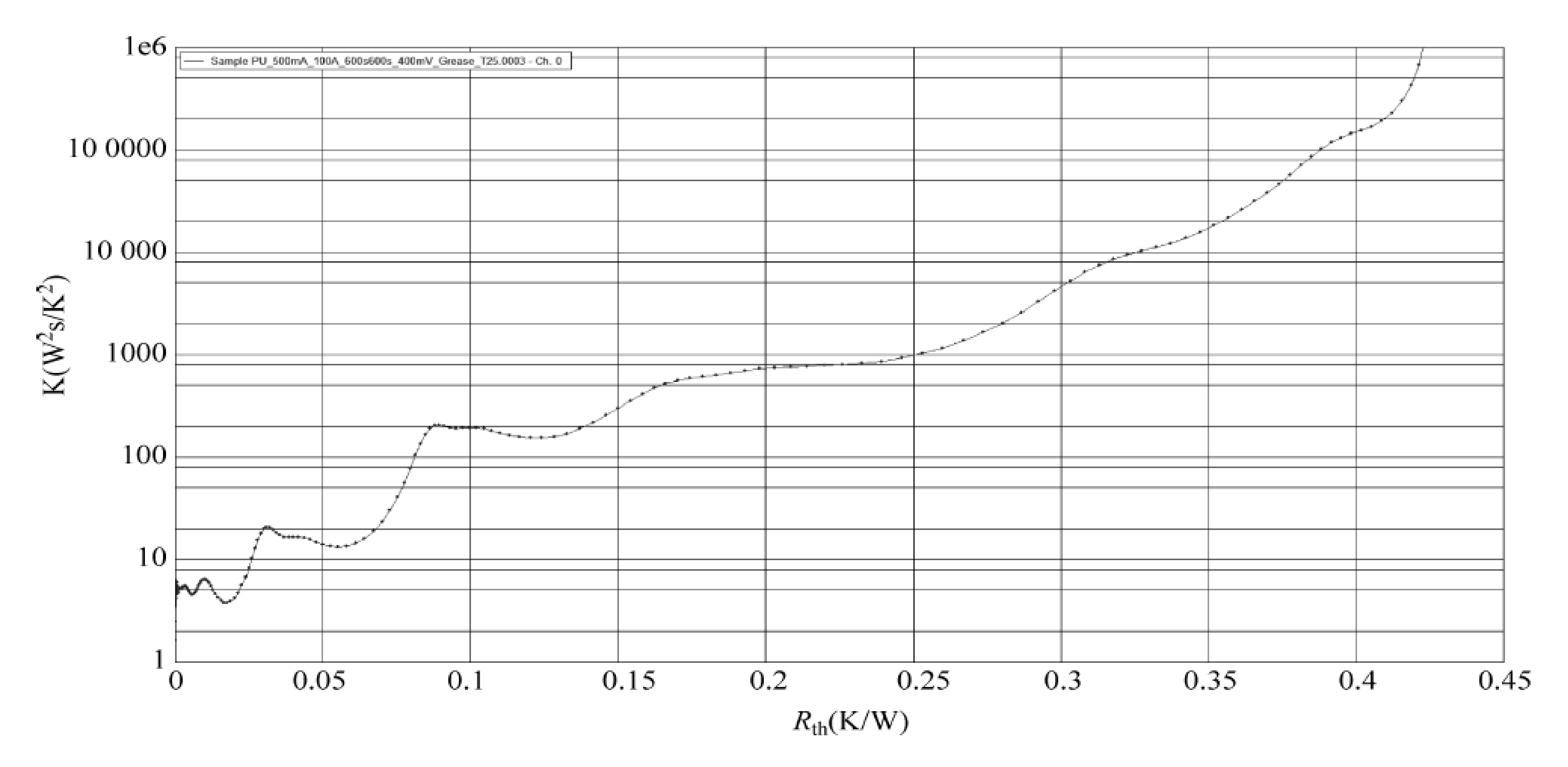


图 6-43　微分结构函数曲线

(3) 按照瞬态热测试的"静态测试方法"进行测试，要求如下：

① 对被测 LED 器件施加加热电流 I_H，加热时间为 t_H，加热时间段结束时，当结温保持稳定，如果在 LED 器件热和辐射测试联合测试平台进行测试，则进行光属性的测量。记录 I_H 加热电流、相应的正向电压 V_H 值和测量的 Φ_e 辐射通量，也就是光功率 P_{opt}；

② 从加热电流 I_H 切换到测量电流 I_M，并适当选择的 t_{MD} 测量延迟时间，记录正向电压的初始值 V_{Fi}；

③ 使用瞬态热测试的"静态测试方法"进行测试，需要以对数时间轴连续记录 $\Delta V_F(t)$ 函数的值；

④ 测量时间 t_M 过去之后，测量并记录正向电压的 V_{Ff} 最终值，如果进行瞬态测量，完成记录 $\Delta V_F(t)$ 函数。

(4) 利用 LED 器件正向电压的温度依赖特性，根据所施加的电功率、发射光功率和测量的正向电压的变化计算出热阻，从而获得真实的热阻值，或者测量、描绘并记录 $\Delta V_F(t)$ 函数，从而获得 LED 器件的结构函数；

(5) 从已知的参考温度、确定的真实热阻和真实加热功率计算出真实的结温；

(6) 根据瞬态双界面分离法，重复步骤(1)～(5)，得到 LED 器件的结-壳热阻 $R_{\theta JC}$；

(7) 在 LED 器件热和辐射测试联合测试平台进行测试时，针对不同的参考温度值，进行联合测试，并得出真实的结温以及 LED 器件的能量转换效率和所有测得的光输出特性，作为 LED 器件结温的函数。

对 LED 器件进行瞬态热测试时，要求测量它们的冷却曲线，原因如下：

(1) 这是 JESD51-14 标准中的要求，因为对 LED 器件测量冷却曲线时，随着所施加的电功率的变化的误差是可以忽略不计的。而且确保了加热电流和测试电流切换后，功率在事实上保持恒定，测得的驱动点的热阻抗用结构函数所表示，这也是一个理论上的要求；

（2）对于 LED 器件的测试，首选的测试方法是在一个单一的测试平台结合热学测量和光输出测量。LED 器件的光输出测量过程需要在正常工作电流被施加到 LED 时，在热稳态情况下进行光输出测量，这意味着 LED 器件的冷却曲线可以在完成标准光输出测量和 LED 器件加热电流切换后自然测得。

为了获得 LED 器件的实际加热功率，需要测量 LED 器件的发射光功率（辐射通量）。为了保持测量数据的一致性，建议在光输出测量期间，将 LED 器件放置在一个与 LED 器件进行瞬态热测试时完全相同的热环境中，并且使用与瞬态热测试时完全相同的环境参考温度。并且，LED 器件的物理组件和测试环境在光输出测量和瞬态热测试之间必须保持机械性能稳定。

为了保证瞬态热测试和光输出测量结果的一致性，可优先采用瞬态热测试与辐射测量联合测试的 LED 器件测试平台，如图 6-44 所示。

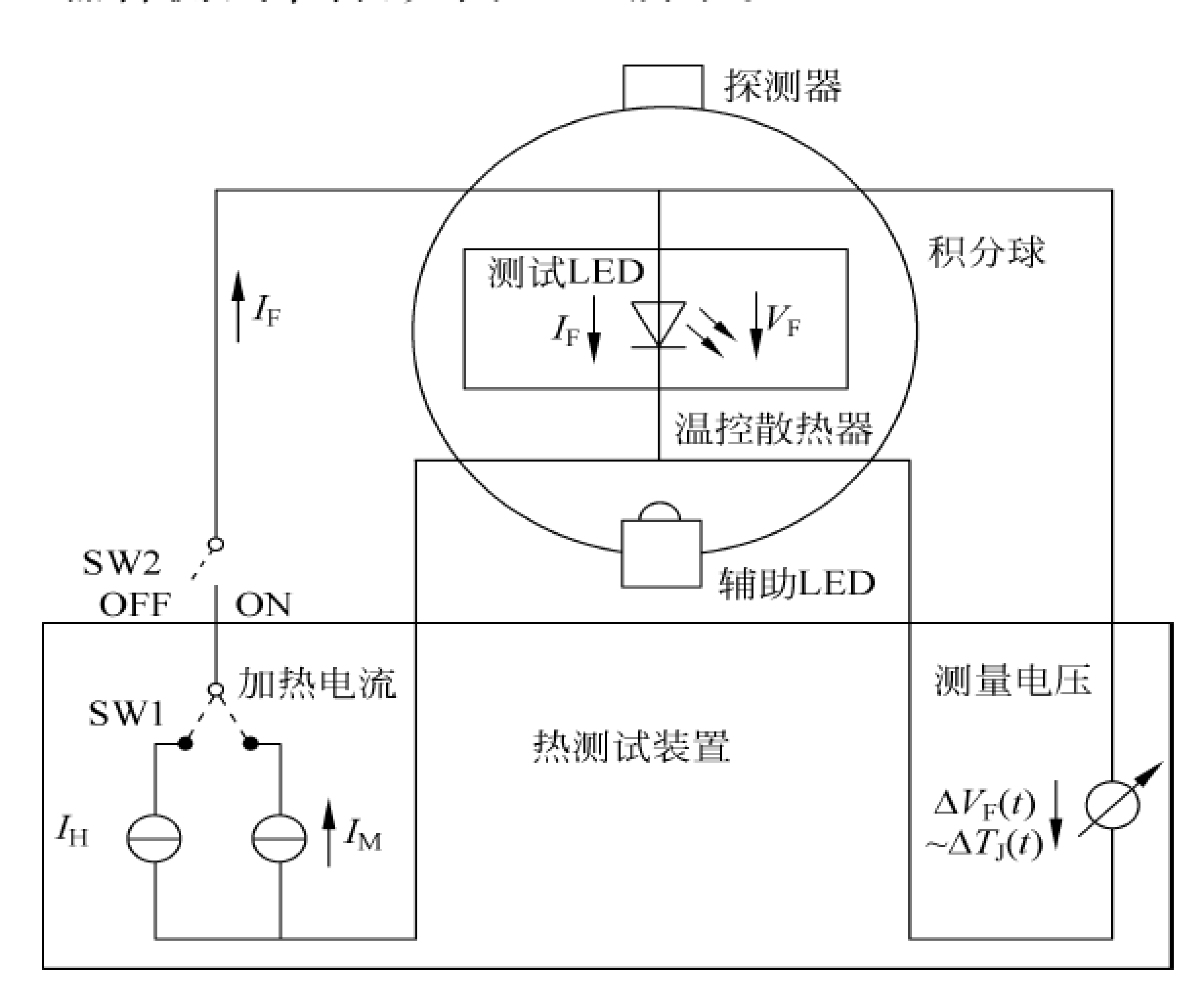


图 6-44　瞬态热测试与辐射测量联合测试的 LED 器件测试平台

瞬态热测试与辐射测量联合测试的 LED 器件测试平台的工作过程如下：

（1）在被测 LED 器件关闭的情况下，进行暗偏移测量；

（2）在被测 LED 器件关闭，参考 LED 点亮的情况，进行自吸收校正；

（3）新的温度（可以被设置为环境温度和结温度）被设置，瞬态热测试与辐射测量联合测试平台等待温度稳定；

（4）新的加热电流被设置，瞬态热测试与辐射测量联合测试平台需等待电压和温度稳定；

（5）辐射和光度参数由过滤器或一个分光计测定，如图 6-45 所示；

（6）从加热电流切换到测试电流，进行瞬态热测试，得到被测 LED 器件热学属性，如图 6-46 所示；

（7）下一步加热电流被设置；

（8）下一步温度被设置。

图 6-47 所示为一个完整的瞬态热测试与辐射测量联合测试平台。

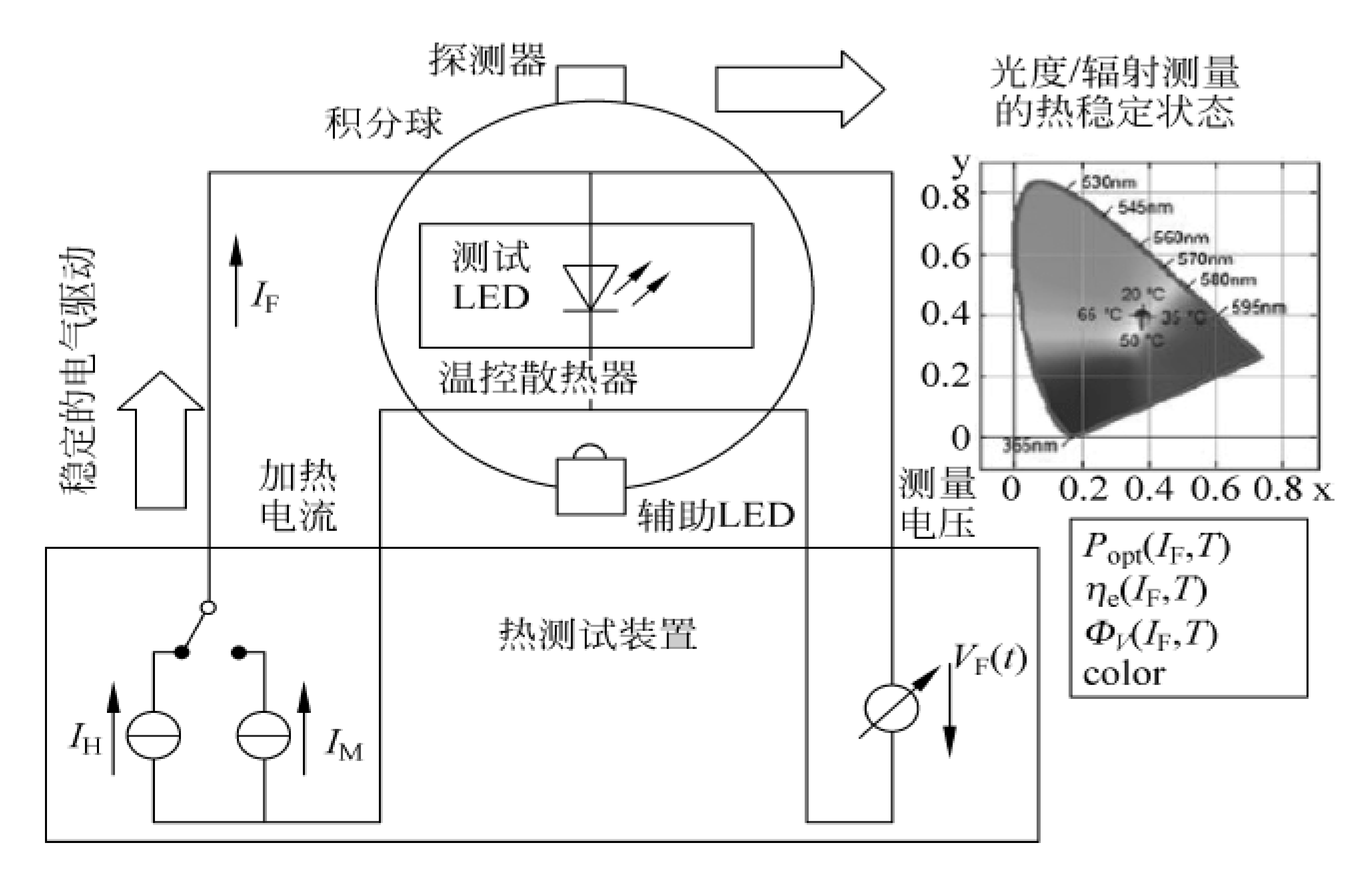


图 6-45　在瞬态热测试与辐射测量联合测试平台进行辐射和光度参数测量

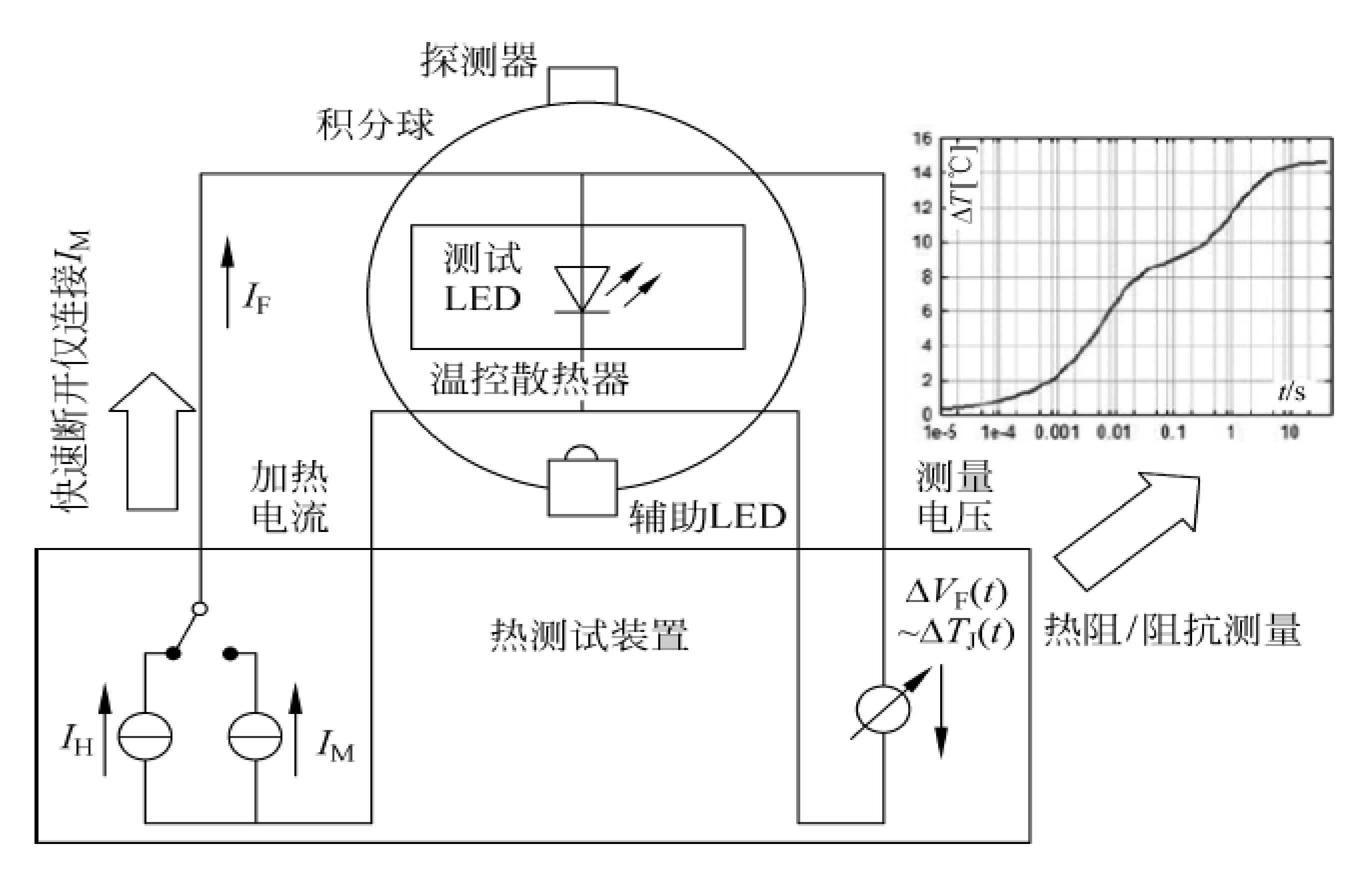


图 6-46　在瞬态热测试与辐射测量联合测试平台进行瞬态热测试



图 6-47　完整的瞬态热测试与辐射测量联合测试平台

6.2 结构函数的应用和案例分析

下面通过实际的测试案例，进一步介绍瞬态热测试后结构函数的应用。

1. 使用瞬态双界面测试法测量半导体器件的结壳热阻

将同一个被测半导体器件分成两种不同的工况放在散热器上：第一种是将被测半导体器件直接放置在散热器上，由于被测半导体器件的壳和散热器之间微小的间隙，实际上被测半导体器件和散热器之间90%的面积是被空气隔开的；第二种是将被测半导体器件放置在散热器上，但是在被测半导体器件的壳和散热器之间，涂上一层很薄的导热硅脂。

对以上两种工况进行瞬态热测试，得到瞬态热测试原始曲线后，在T3Ster-Master评估软件中进行分析，得到两种工况下的结构函数曲线。由于同一个被测半导体器件放置在散热器上，因此，两种情况下热量仍然是从热源(Junction)向着环境-散热器进行散发。

两种工况下，所不同的是在被测半导体器件的壳的外部对散热路径发生了干涉：一种工况是直接放在散热器上，另一种工况是涂抹导热硅脂后放在散热器上。因此，在被测半导体器件内部，从结到壳部分的散热路径没有发生任何变化，而从被测半导体器件的壳的外部到环境的散热路径受到了影响。

将两条结构函数曲线放在一起进行对比，前端重合部分的 X 轴的读数，就是被测半导体器件的结壳热阻，如图6-48和图6-49所示，分别为积分结构函数曲线和微分结构函数曲线。

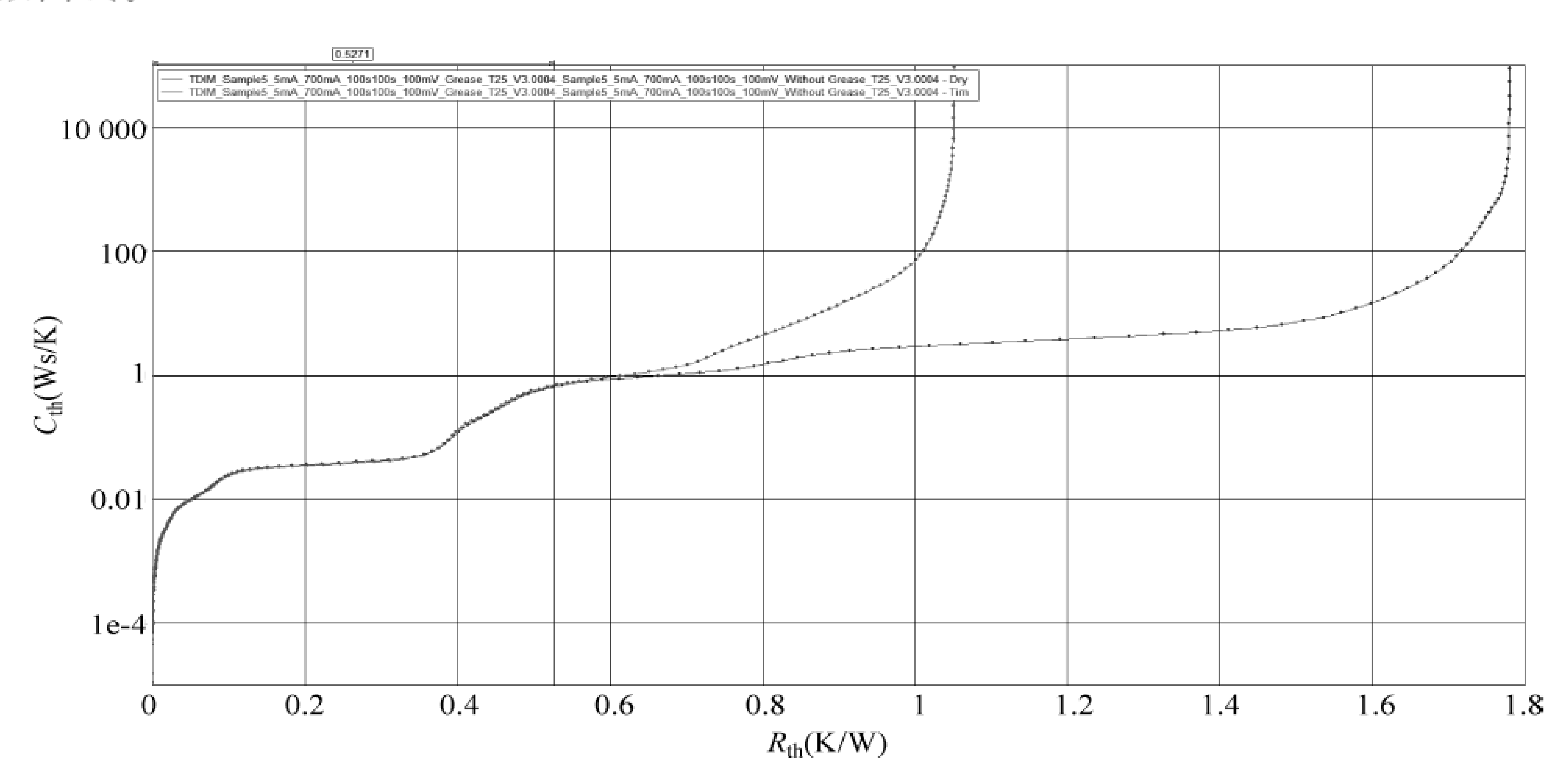


图6-48 积分结构函数曲线

通过微分结构函数曲线，可知此被测半导体器件的结壳热阻为 $R_{thjc}=0.5271$K/W。通过微分结构函数曲线可以把结构函数上分歧点辨识得更加清楚。

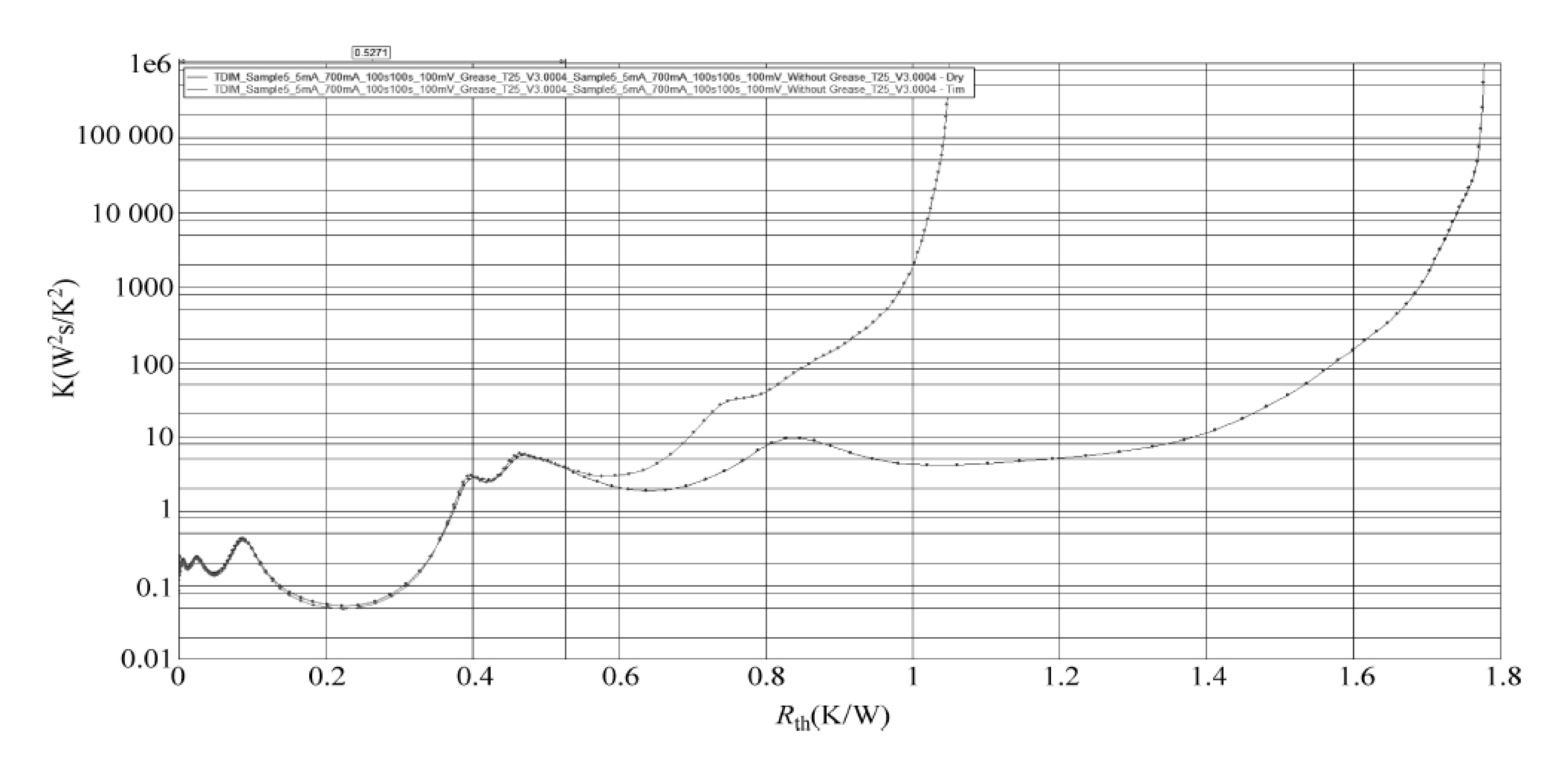


图 6-49　微分结构函数曲线

通过瞬态双界面测试方法可以对被测半导体器件的结壳热阻进行测量，得到被测半导体器件结壳热阻后，可以对被测半导体器件的质量进行评估，并且可以将此结壳热阻值作为被测半导体器件的数据表来使用。

2. 对被测半导体器件封装内部的缺陷进行分析

使用结构函数曲线可以对被测半导体器件封装内部的缺陷进行分析。

如图 6-50 所示，现在有两个被测半导体器件，在测试中发现一个半导体器件的结电压过低，表明其结温过高。

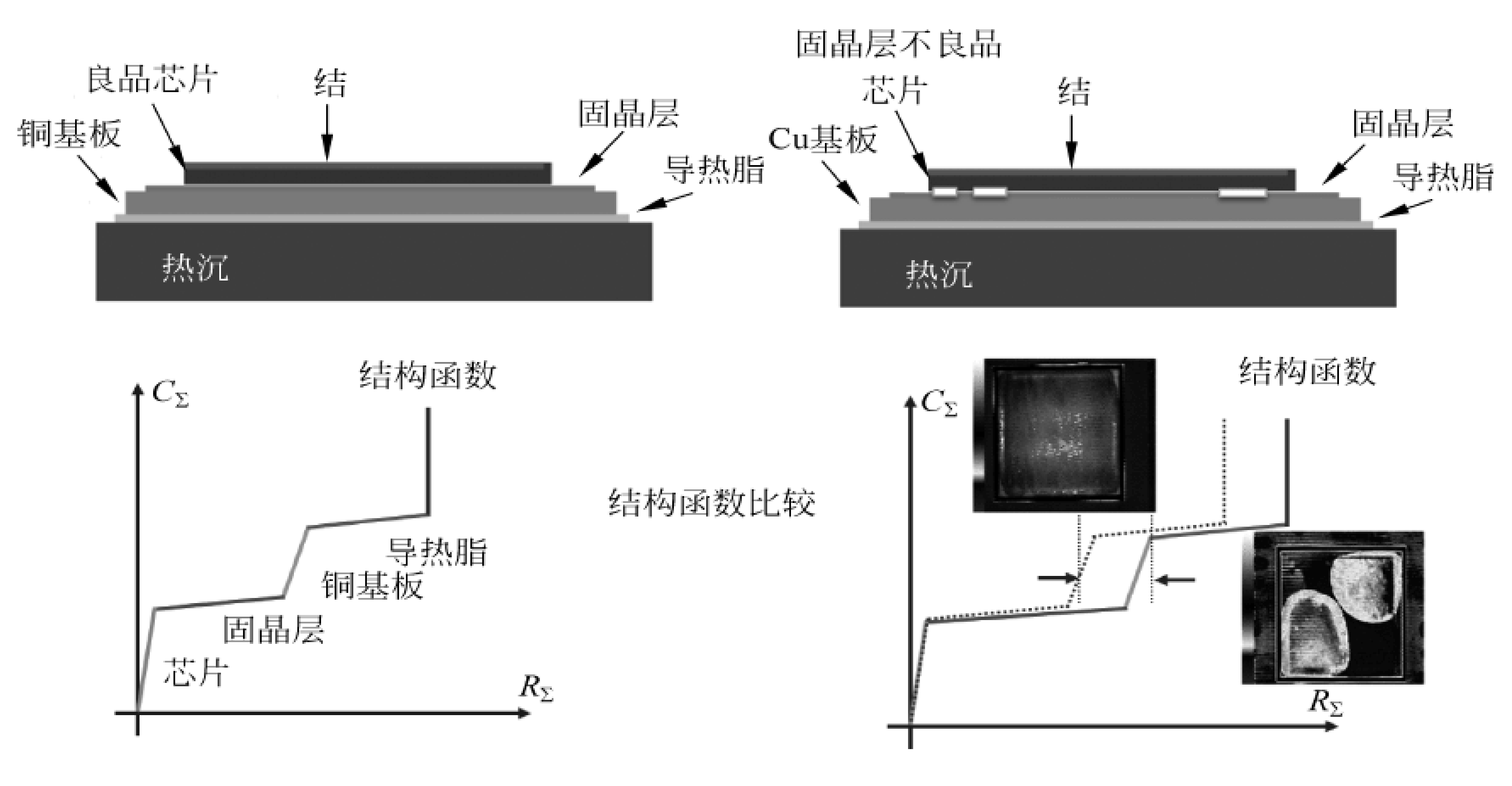


图 6-50　通过结构函数曲线的对比，可知固晶层部分发生了异常

使用瞬态热测试设备，对被测半导体器件进行瞬态热测试。瞬态热测试完成后，将两个被测半导体器件得到的结构函数曲线放在一起进行对比。对比中发现，其中不良品的结构函数曲线的固晶层部分热阻变大了，意味着固晶层在被测半导体器件封装的过程中出现了异常，导致固晶层对热量的阻碍变大，固晶层部分的热阻变大，如图 6-50 所示。

通过瞬态热测试设备获得的结构函数曲线，可以清晰地获得被测半导体器件封装内部出现异常的位置，并对异常进行分析。

3. 对被测半导体器件贴片工艺进行分析

通过结构函数可以对被测半导体器件表面贴片安装的工艺进行分析。现有一种被测半导体器件通过表面贴片安装工艺焊接到 PCB 板上。在表面贴片工艺完成后的测试中发现，有的被测半导体器件出现了结电压过低的现象，表明结温出现了异常。

使用瞬态热测试设备，对此种被测半导体器件进行瞬态热测试。瞬态热测试完成后，将获得的被测半导体器件的结构函数曲线放在一起进行对比。

在对比中发现，C08 号良品的结构函数曲线和 C17 号不良品的结构函数曲线外形很近似，但是分析被测半导体器件封装内部的结构函数曲线时发现，C17 号不良品的结构函数曲线比 C08 号良品的结构函数曲线大了一些，意味着 C17 号不良品封装内部的热阻值比 C08 号良品封装内部的热阻值大，此时 C17 号不良品出现结电压过低、结温过高的异常，是由于 C17 号不良品封装出现问题造成的，有可能是 C17 号不良品出现了封装与基板分层的问题。

在对比中还发现，C08 号良品的结构函数曲线和 C02 号不良品的结构函数曲线形状相差很多，分析 C08 号良品的结构函数曲线和 C02 号不良品的结构函数曲线时发现，C08 号良品封装内部的结构函数曲线和 C02 号不良品封装内部的结构函数曲线重合非常好，而 C08 号良品封装外部的结构函数曲线和 C02 号不良品封装外部的结构函数曲线相差很多，意味着 C02 号不良品封装外部的热阻值比 C8 号良品封装外部的热阻值大，此时 C02 号不良品出现结电压过低、结温过高的异常，是由于 C02 号不良品表面贴片安装工艺出现问题造成的，有可能是 C02 号不良品在贴片安装工艺的过程中出现了焊接缺失的情况，如图 6-51 所示。

4. 导出被测半导体器件的简化热模型，并对仿真软件中的模型进行修正

使用热仿真分析软件可以很方便地对被测半导体器件的散热路径进行分析和评估，但是在建模的过程中，需要输入大量的参数，例如：材料的热导率和比热等。但是在某些条件下，只能输入经典参数值，这样会导致模型和实际的被测半导体器件的散热路径上的材料特性存在差异。

可以使用瞬态热测试设备对被测半导体器件进行瞬态热测试，得到结构函数曲线后，使用 T3Ster-Master 评估分析软件对得到的结构函数进行分析，可以得到散热路径的简化热模型。通过简化热模型，可以对被测半导体器件的模型进行修正。甚至可以将简化热模型导入到热仿真分析软件中，直接使用，得到被测半导体器件的结温、瞬态热阻抗曲线和瞬态结温变化等重要指标，如图 6-52 所示。

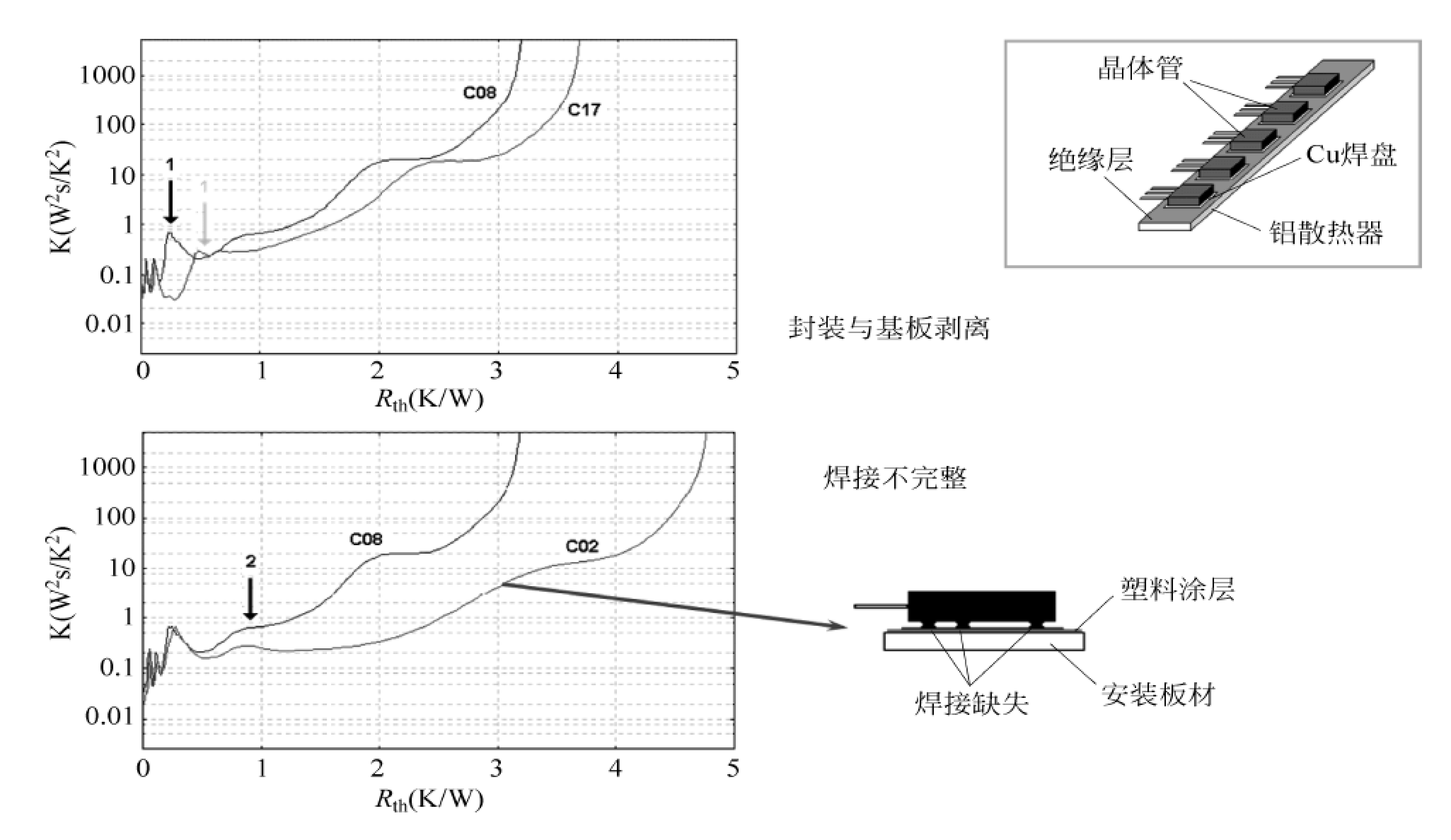


图 6-51　通过结构函数曲线的对比，对贴片安装的工艺进行分析

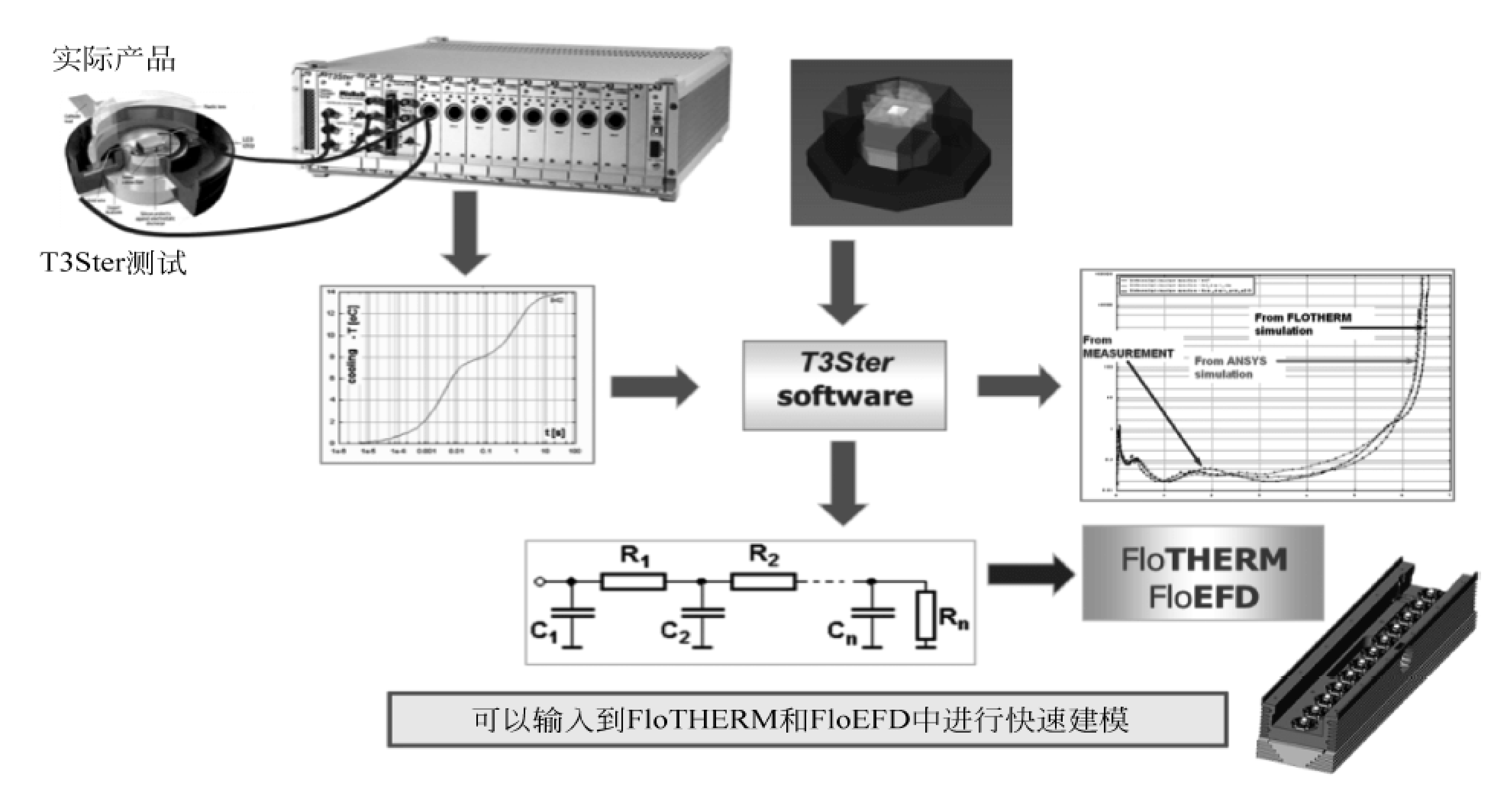


图 6-52　通过结构函数曲线，得到被测半导体器件的简化热模型

5．通过结构函数，对可靠性测试后的被测半导体器件的封装质量进行再评估

在被测半导体器件完成封装后，可以通过瞬态热测试后的结构函数曲线对被测半导体器件的散热路径进行分析，找到热阻过大的部分，进行改善，以降低热阻值及结温，提高封装质量。同样，也可以在被测半导体器件进行可靠性测试后，再次对被测半导体器

件进行瞬态热测试。通过固定的时间间隔进行的瞬态热测试得到结构函数曲线，将它们放在一起进行对比，可以找到在可靠性测试过程中，被测半导体器件封装内最快降级的部分，以及失效的区域，从而对被测半导体器件的封装质量在可靠性测试之后进行再评估。

通过结构函数曲线不仅可以发现被测半导体器件封装内降级、失效的区域，还可以通过结构函数曲线将降级、失效区域的降级速率很清楚的通过结构函数呈现出来，帮助判断降级、失效发生的时间，以方便更加快速地找到对策，解决实际的问题。

如图 6-53 所示，将一个被测 LED 器件，放在高温、高湿的老化实验箱中进行老化实验。在老化实验中，对被测半导体器件分别在 0 小时、3 小时、6 小时和 24 小时进行瞬态热测试。瞬态热测试完成后，将结构函数曲线放在一起进行对比。在对比中可以发现，被测 LED 器件的结-环境的热阻值一直在变大，这是符合事实的。因为被测 LED 器件通过涂抹导热硅脂粘贴在散热器上，导热硅脂在可靠性测试过程中，一直在发生降级，因此导热硅脂部分的热阻值一直在变大。

现在对被测 LED 器件的封装内部进行分析。从结构函数曲线的对比可知，代表 Die Attach 部分的热阻值的波峰一直在向右延伸，意味着 Die Attach 部分的热阻值一直在变大，从而可知 Die Attach 部分在可靠性测试过程中发生了降级，并且从结构函数曲线的对比还可以知道 Die Attach 部分在可靠性测试过程中的降级速率，如图 6-53 所示。

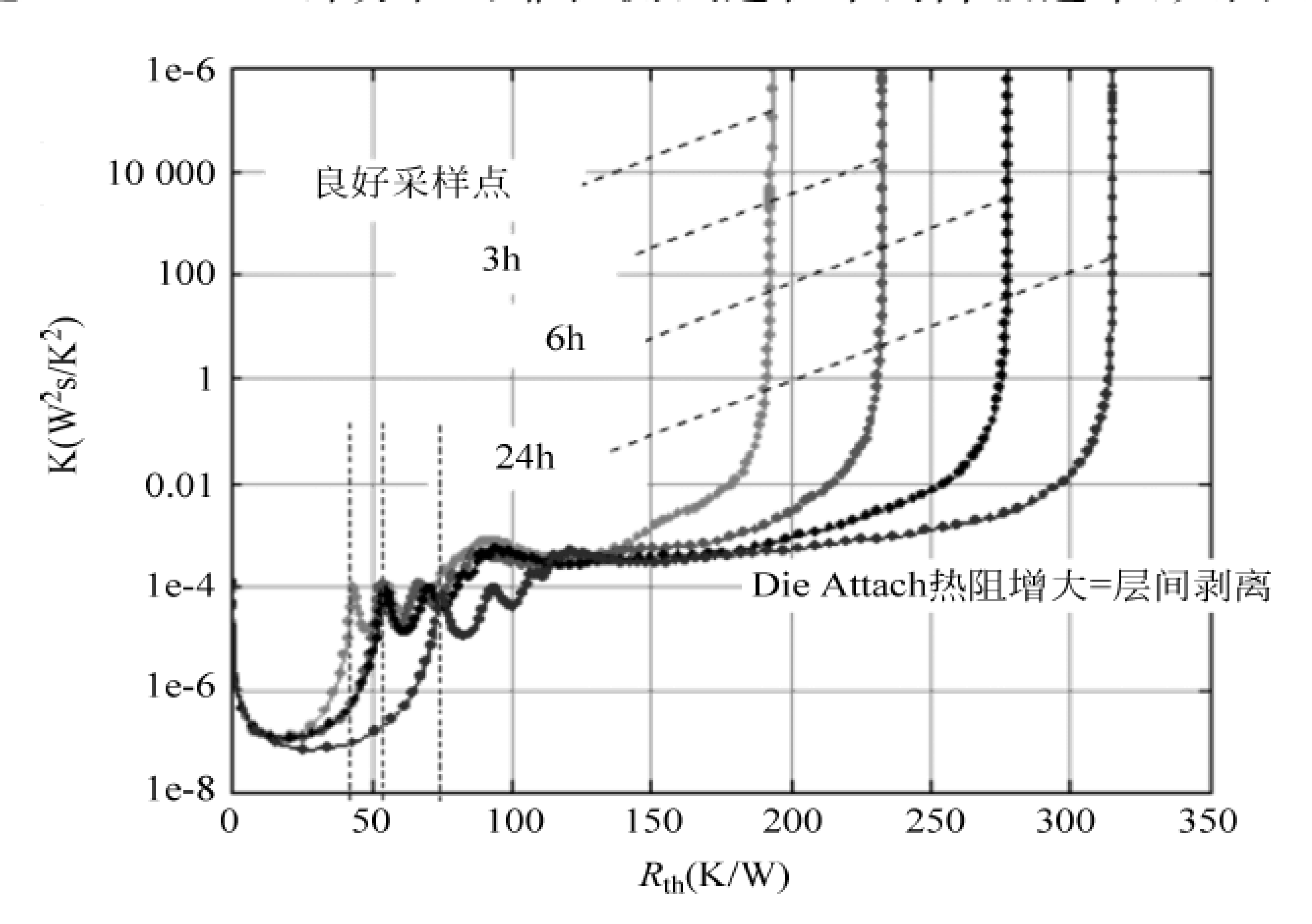


图 6-53　对被测半导体器件进行瞬态热测试，通过结构函数曲线找到降级、失效的区域

6. 如何获得正确的结构函数曲线

对 LED 器件进行瞬态热测试时，为了获得正确的结构函数曲线，需要扣除掉光功率，使用真正的热功率计算结构函数曲线，以获得正确的结果。

如图 6-54 所示，两个被测 LED 器件，使用相同的光源、相同的封装材料，以及使用相同的封装工艺，只有被测 LED 器件的透镜颜色不同，一个为蓝色透镜，一个为绿色透镜。当使用电功率计算热阻时，发现结构函数曲线并不重合，但这是与实际情况相违背的。

因为使用了相同的光源、相同的封装材料，以及使用相同的封装工艺，理论上得到的散热路径应该高度相同，因此得到的结构函数曲线应该高度重合才符合实际的情况，如图 6-54 所示。

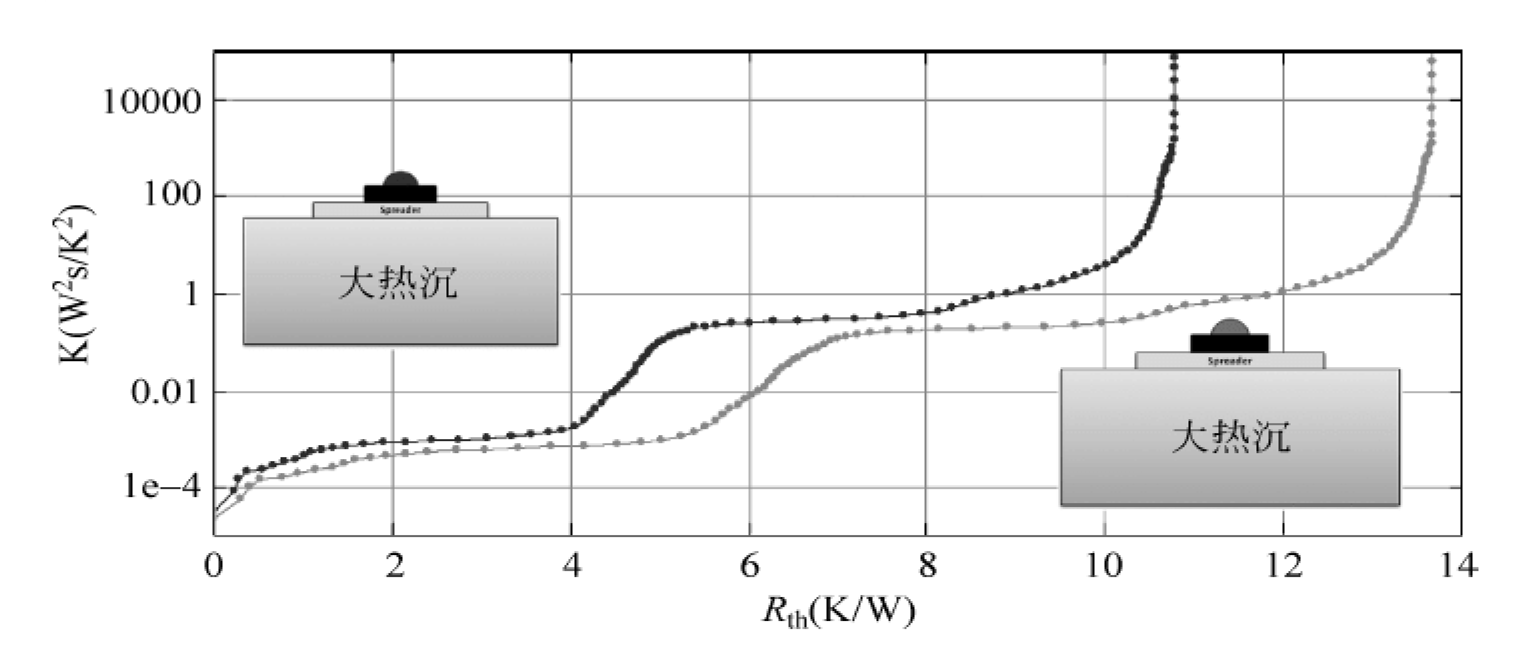


图 6-54　由于使用电功率进行计算，导致结构函数曲线并不重合

造成上述问题的原因是在计算结构函数的过程中使用了电功率作为计算热阻和产生结构函数曲线的参数。由于输入的电功率不仅有一部分转化为热功率被耗散掉，同时有相当的一部分转化为光输出，因此在计算热阻和产生结构函数的过程中，需要扣除掉光功率，使用真正的热功率进行计算才可以。如图 6-55 所示，在输入 800mA 工作电流后，蓝色灯珠的电功率为 3.08W，绿色灯珠的电功率为 2.96W；蓝色灯珠的发光效率为 33.8%，而绿色灯珠的发光效率为 12.4%；蓝色灯珠扣除掉光功率后的热功率为 2.04W，而绿色灯珠扣除掉光功率后的热功率为 2.59W。

25℃时的发光率	蓝色	绿色
500mA	41.3%	15.5%
650mA	37.2%	--
750mA	34.8%	--
800mA	33.8%	12.4%



实际的热功耗	蓝色		绿色	
	电功耗	热功耗	电功耗	热功耗
500mA	1.71W	1.00W	1.73W	1.46W
650mA	2.33W	1.46W		
750mA	2.56W	1.67W		
800mA	3.08W	2.04W	2.96W	2.59W

图 6-55　扣除光功率后，蓝色灯珠的热功率和绿色灯珠的热功率的对比

使用真正的热功率进行计算后，可以得到真正的结构函数曲线，并且结构函数曲线高度重合，这是与事实情况相符的，因为两个被测 LED 器件，使用相同的光源、相同的封装材料，以及使用相同的封装工艺，只有被测 LED 器件的透镜颜色不同，因此两个被测 LED 器件的散热路径应该高度相同，得到的结构函数曲线应该高度重合才符合实际的情

况，如图 6-56 所示。

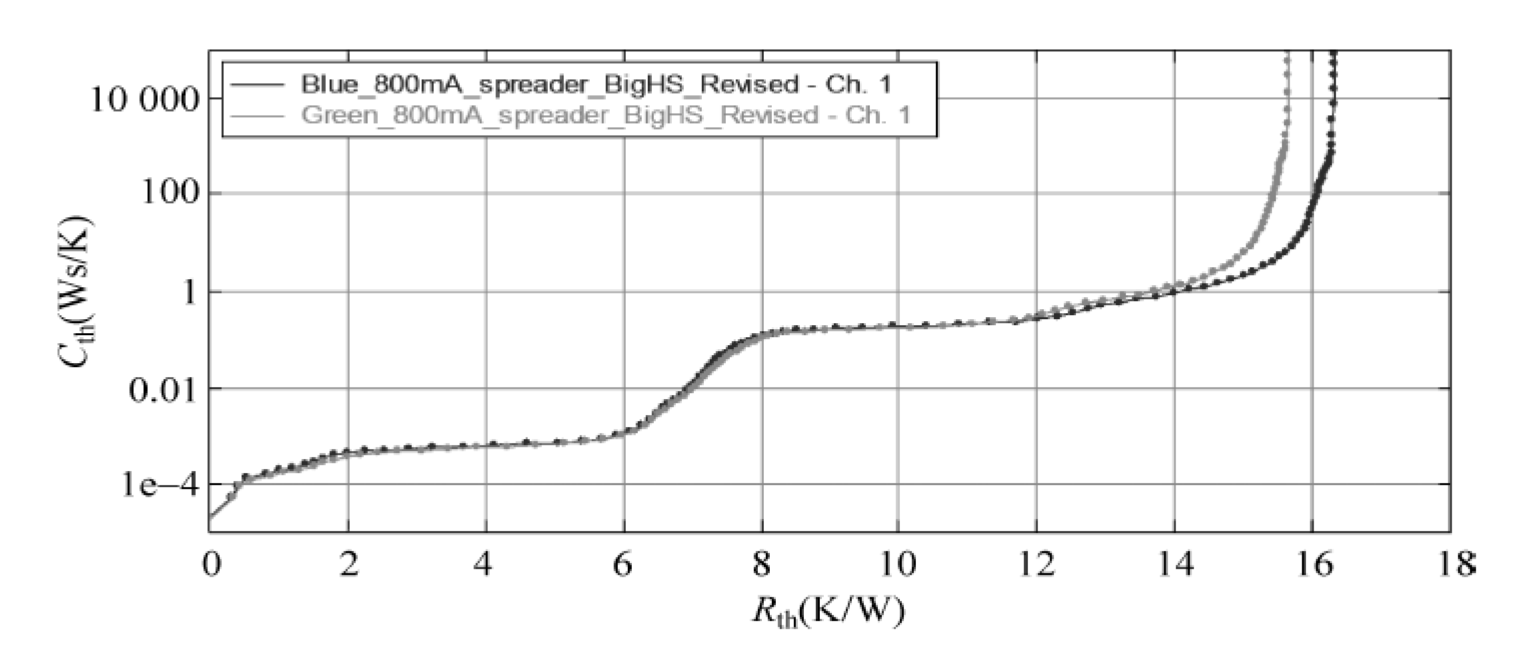


图 6-56 使用真正的热功率进行计算，得到的结构函数曲线高度重合

从上面的测试案例可知，对于被测的 LED 器件，如果要得到符合事实的结构函数曲线以及实际的热阻值，应该使用真正的热功率进行计算才可以，否则得到的结构函数曲线和热阻值是比实际的结构函数曲线和热阻值偏小的。

6.3 对 LED 整灯进行瞬态热测试的测试案例

1. LED 射灯的测试案例

瞬态热测试设备还可以对 LED 整灯进行瞬态热测试，测试的时候被测的对象仍然是整灯中的 LED 器件。如图 6-57 所示的整灯，包括光源和灯具。

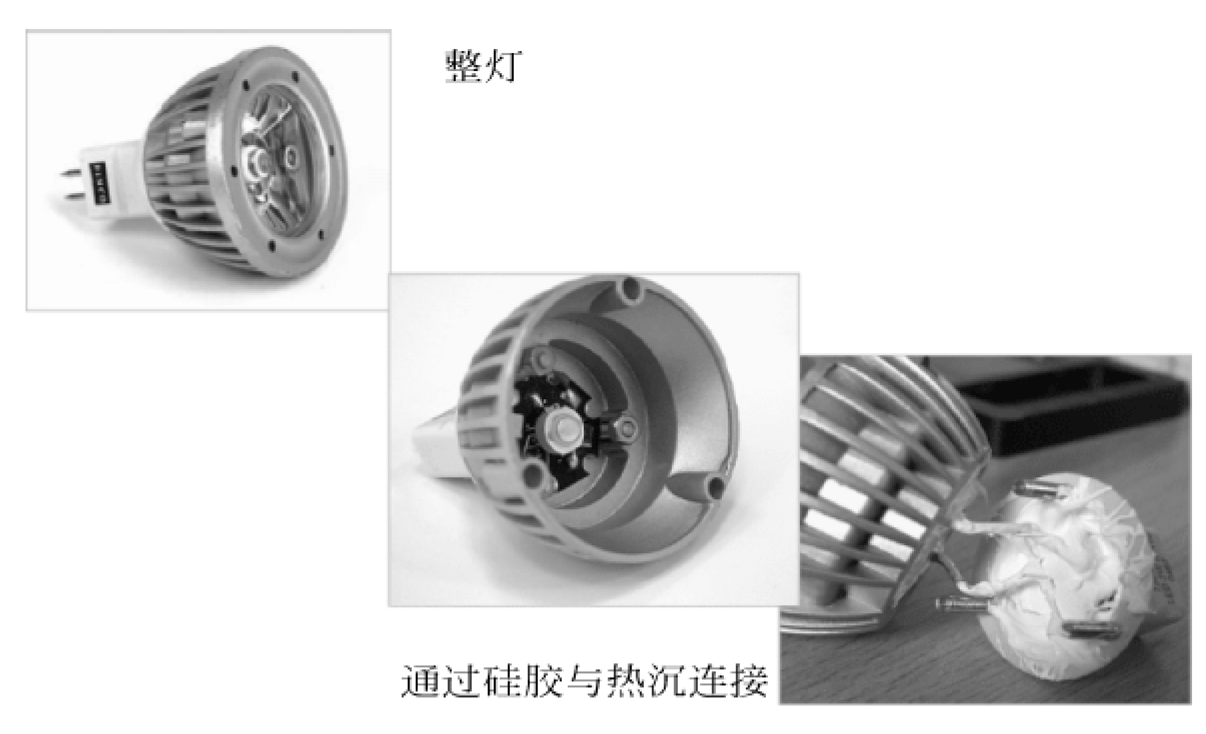


图 6-57 整灯的图示

在这个案例中，整灯的制造商要考察两种底座：一种是带散热器的金属底座；另一种是不带散热器的塑料底座，如图 6-58 所示。在制造商的设想中，带散热器的金属底座的散热效果要好，LED 器件的结温更低，但是比不带散热器的塑料底座的样品的结温低多少，却不知道。因此对 LED 整灯进行瞬态热测试，通过结构函数曲线进行考察，考察对象为 R_{thJA}（结到空气中的热阻）。




图 6-58 整灯分别使用带散热器的金属底座和不带散热器的塑料底座

将整灯放置在符合 JEDEC 组织 JESD51-52 标准的静态空气箱中，在保证自然对流的情况下进行瞬态热测试，如图 6-59 所示。

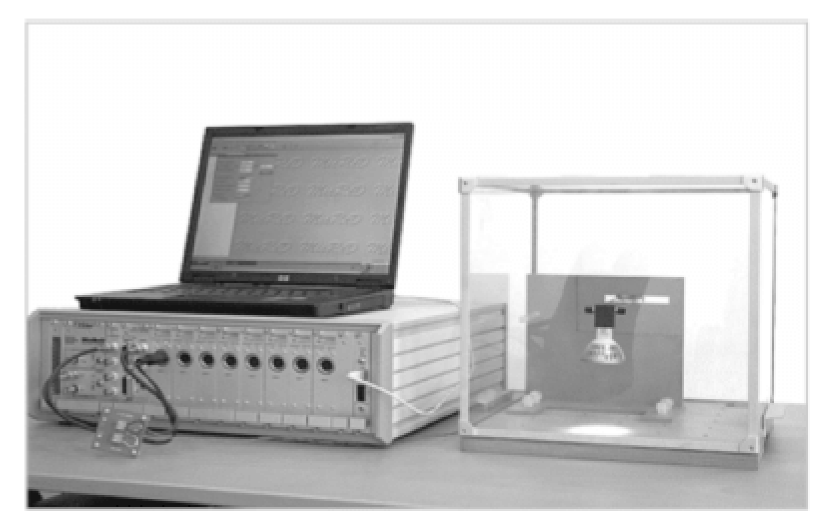
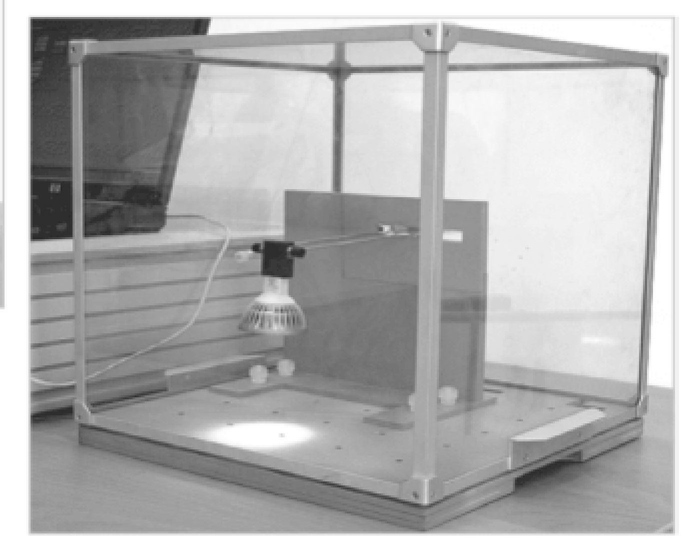



图 6-59 将整灯放置在静态空气箱中进行测试

将带散热器金属底座的样品通过瞬态热测试得到的结构函数曲线和不带散热器的塑料底座的样品通过瞬态热测试得到的结构函数曲线放在一起进行对比，对比中发现：金属底座样品的散热性能确实比塑料底座的样品要好，热阻要低，但是只是低了一点点。这是因为 LED 整灯的灯具具有良好的散热性能，绝大部分热量已经通过灯具耗散出去了，而底座并不位于整灯的主散热路径上，即便再换一个带更大一些散热器的金属底座，对于结温的降低帮助也不大，如图 6-60 所示。

通过瞬态热测试，可知两个使用了不同底座的整灯确实具有不同的散热能力，但是这个散热能力的差别是很微小的，对结温的影响并不大。因此，可以使用不带散热器的塑料底座作为生产的部件使用，因为它具有更低的成本，并且对结温的影响并不大。

因此，即便是散热路径上只有很小的差异，也可以通过结构函数曲线的对比辨别出来。通过瞬态热测试可以有效地降低设计上的冗余，减少生产的成本。

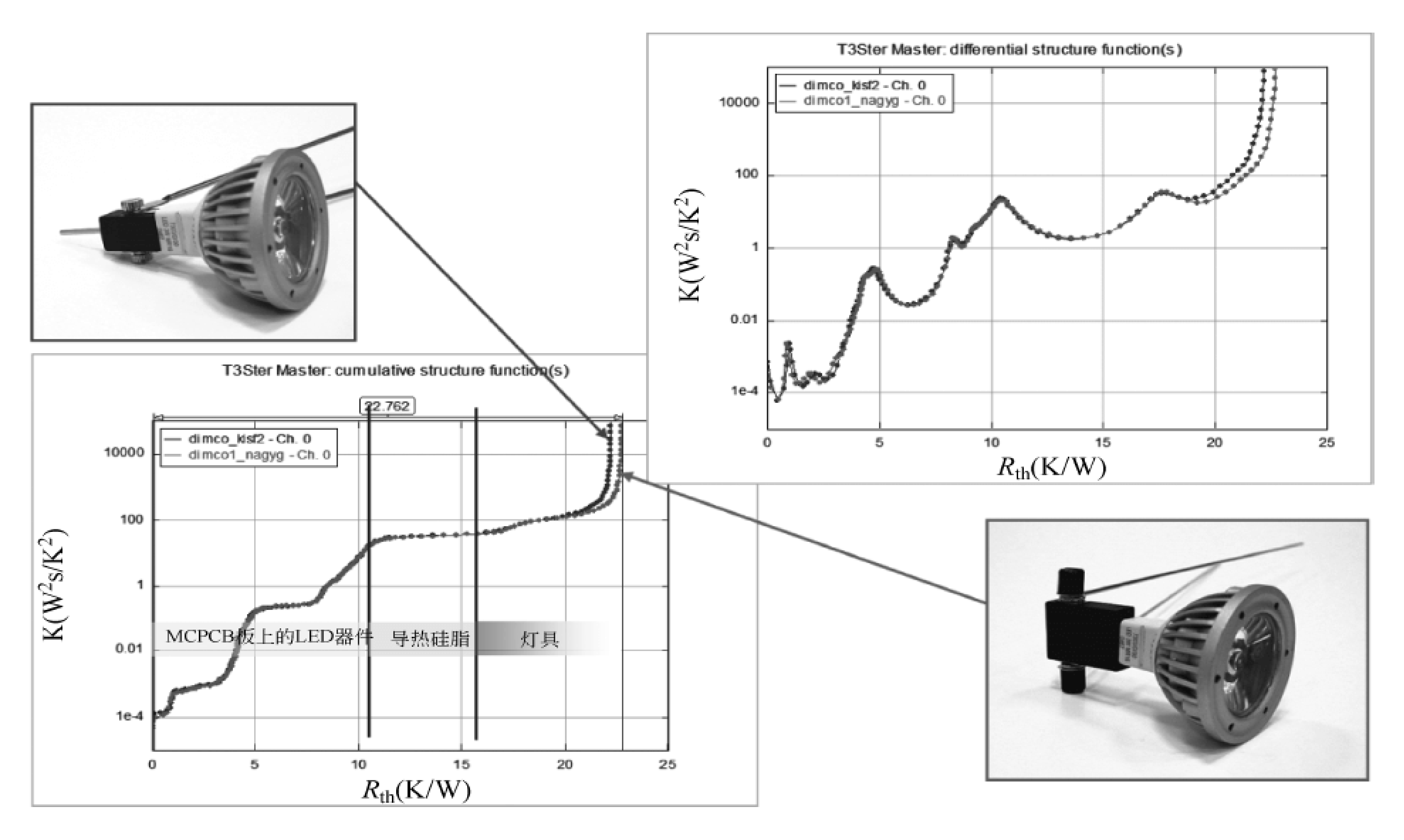
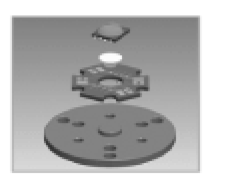
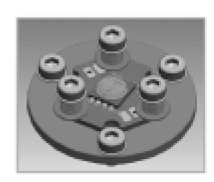
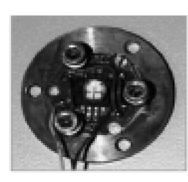


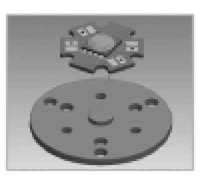
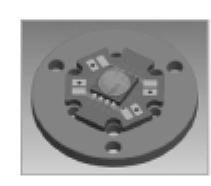
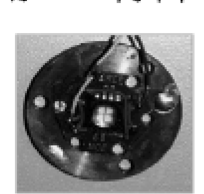
图 6-60　带散热器金属底座样品的结构函数曲线和不带散热器塑料底座样品的结构函数曲线的对比

2. 10W 白光 LED 灯的测试案例

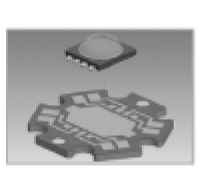
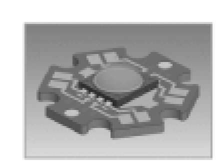
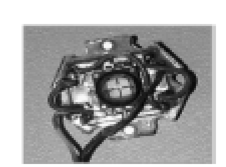
现有同一种 LED 器件分三种不同的工况组装成 LED 模组：第一种情况，使用 FR4 的 PCB 板，将 Heat-Slug 和 Copper Block 通过 TIM 材料黏结起来，并命名为 FSF52；第二种情况，使用 FR4 的 PCB 板，将 Heat-Slug 和 Copper Block 焊接起来，并命名为 TG2500；第三种情况，更换为 MCPCB 板，将 Heat-Slug 焊接到 MCPCB 板上，并命名为 AL。对以上三种不同工况组成的 LED 模组进行瞬态热测试，如图 6-61 所示。



FSF52


(a) FR4 PCB板在散热片和铜块之间使用TIM材料



TG2500


(b) FR4 PCB板将散热片焊接到铜块上



AL


(c) 将散热器焊接在铝和铜材构成的MCPCB板上

图 6-61　三种不同工况组成的 LED 模组

对以上三种 LED 模组进行瞬态热测试，瞬态热测试的条件为：加热电流 700mA，环境温度 85℃。在测试中为了获得准确的结构函数曲线和热阻值，使用电、光、热联合测试平台进行测试，以便在测试中，自动扣除光功率。

将三个被测 LED 模组得到的结构函数曲线放在一起进行对比，由于三个被测的 LED 模组使用了相同的 LED 光源，因此从 LED 光源的热源(Junction)到 LED 光源的壳(case)的散热路径是相同的，因此结构函数曲线对比时，前端重合的地方是 LED 光源的结-壳热阻，从图中可以读出约为 2K/W，并且从结构函数曲线的对比可知，命名为 TG2500 的 LED 模组的结到环境的热阻最小，命名为 AL 的 LED 模组的结到环境的热阻居中，命名为 FSF52 的 LED 模组的结到环境的热阻最大，如图 6-62 所示。

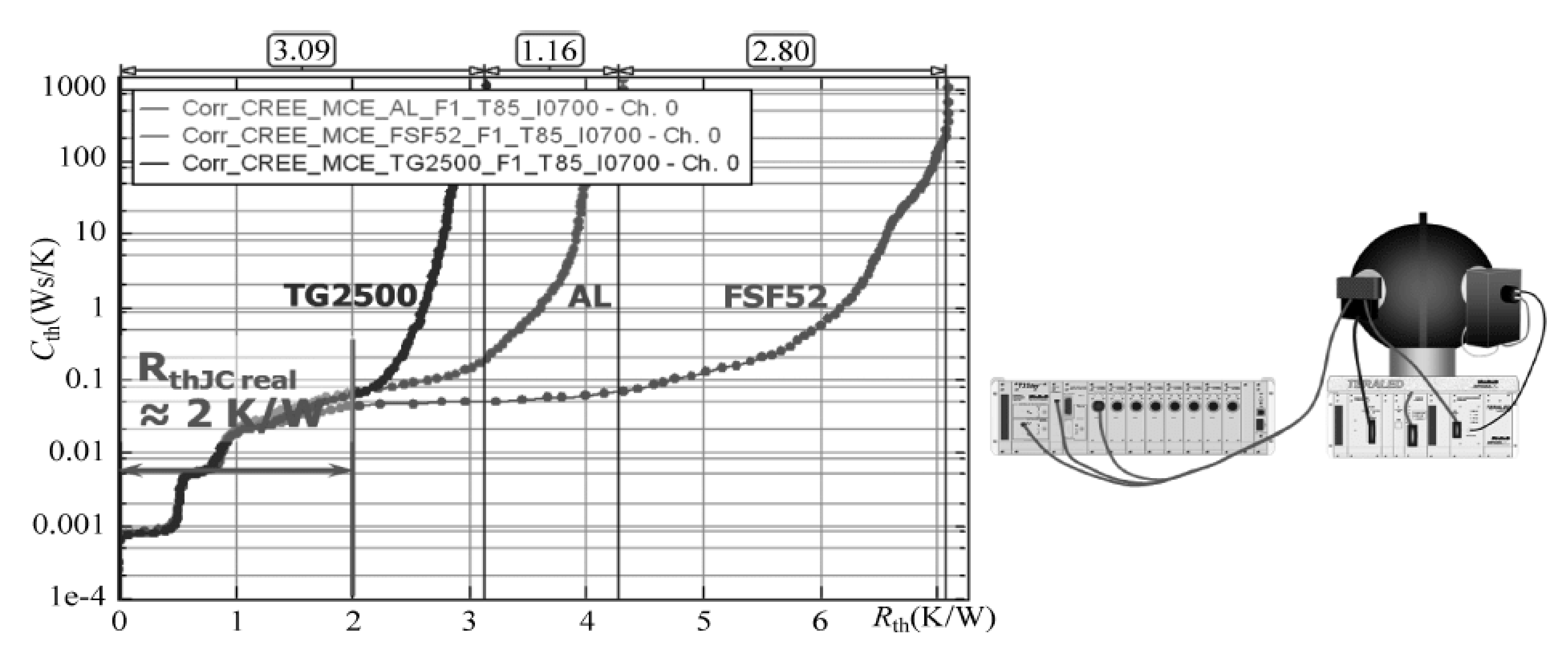


图 6-62　三个 LED 模组的结构函数曲线的对比

通过三个被测 LED 模组的结构函数曲线，可以得到 LED 光源的结-壳热阻，并可以用此结-壳热阻值，和 LED 光源厂家提供的结-壳热阻值进行对比，以便对来料产品的质量进行监控。

将其中命名为 AL-2 的 LED 模组单独挑选出来，进行有条件的瞬态热测试：加热电流 700mA，环境温度从 15℃到 85℃进行改变，将得到的一系列的结构函数曲线放在一起进行对比，如图 6-63 所示。

在结构函数曲线的对比中，可知尽管环境温度发生了十分剧烈的变化，从 15℃到 85℃进行改变，但 LED 光源本身的结构函数曲线十分稳定，意味着 LED 光源本身封装十分稳健，在环境温度的变化过程中，保持了稳定，因此结构函数曲线没有发生任何变化，是质量十分优秀的产品。

而 AL-2 的 LED 模组的结-环境的结构函数曲线，随着环境温度的变化发生了变化，意味着：AL-2 的 LED 模组的结-环境的热阻值，随着环境温度的变化发生了变化。由于 LED 光源的结构函数曲线在环境温度的变化过程中，保持了稳定，因此可以确定 AL-2 的 LED 模组的结-环境的结构函数曲线的变化是由于 MCPCB 板和 TIM 材料在环境温度的变化过程中，质量发生了变异造成的。通过结构函数曲线可以很好地显示出在环境温度的变化过程中，LED 模组内部出现质量变异的区域。

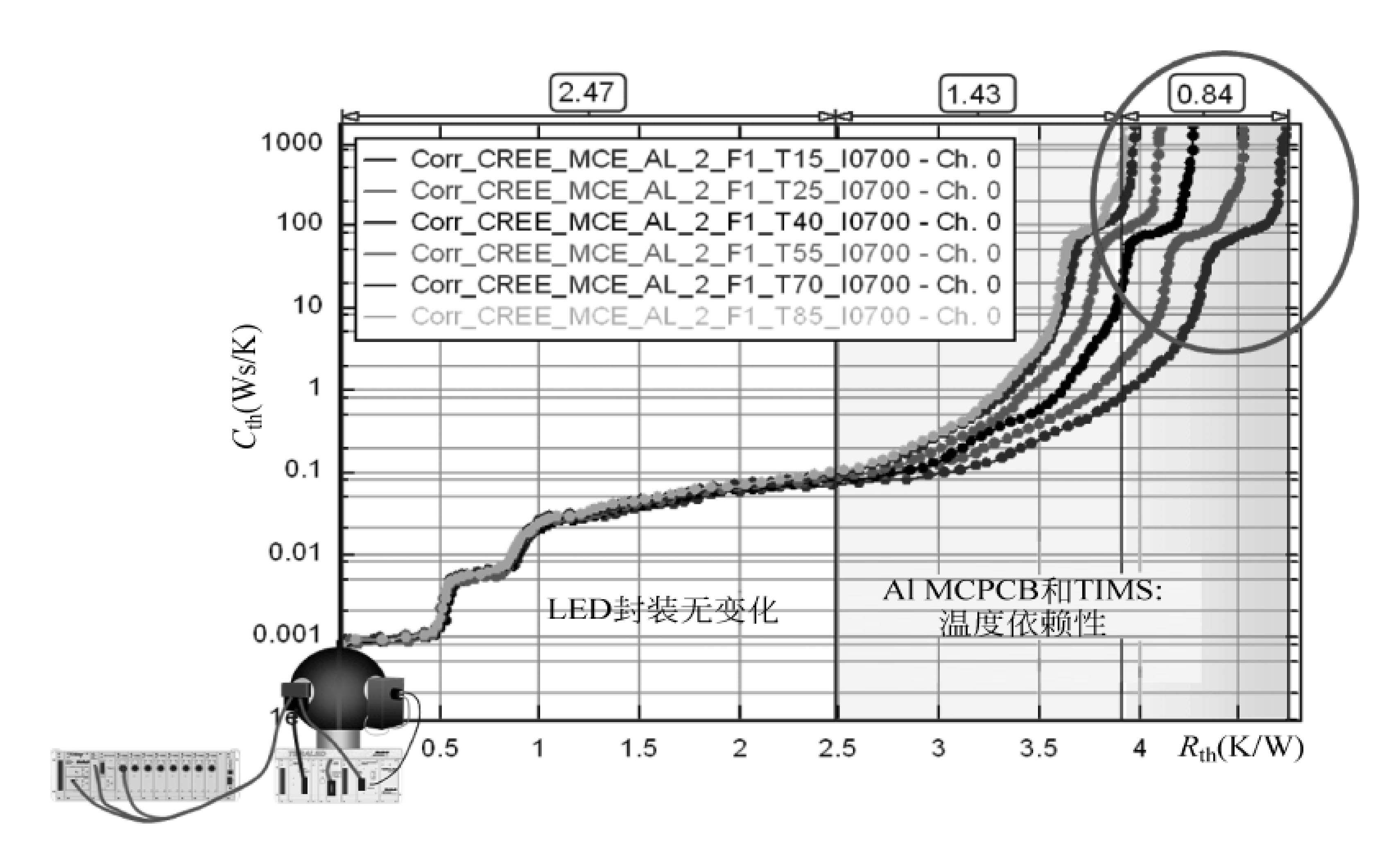


图 6-63　对 AL-2 的 LED 模组进行瞬态热测试，将得到的结构函数曲线放在一起对比

3. LED 器件老化测试结果的对比

对两个被测 LED 器件进行可靠性测试，在可靠性测试之中和可靠性测试之后，进行瞬态热测试。将得到的结构函数曲线，放在一起对比，从图 6-64 中可知，44 号被测 LED 器件十分稳健，即便是老化测试进行到 3000 小时，被测 LED 器件的结-环境热阻只增加了 0.9K/W，被测 LED 器件封装内部的结构函数曲线保持稳定，这意味着 44 号被测 LED 器件是质量十分稳定的器件。

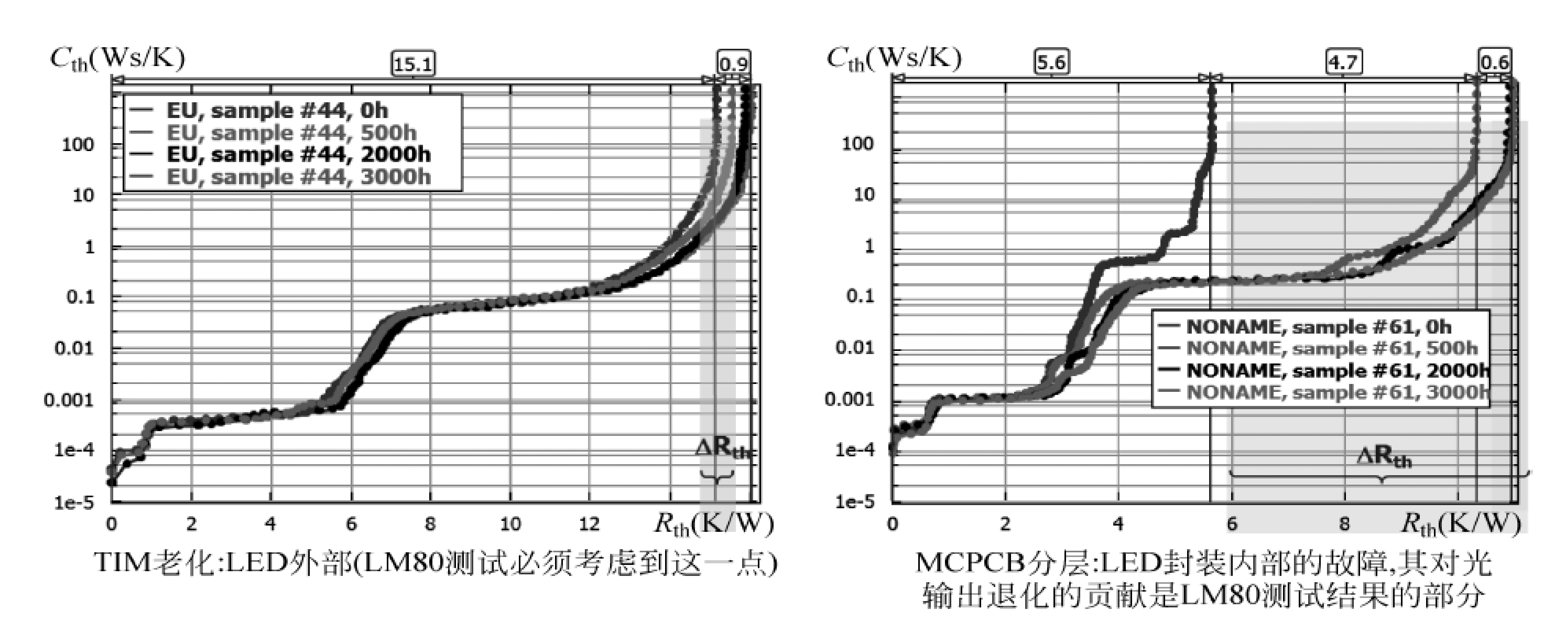


图 6-64　老化 3000 小时后，稳定 LED 和最快退化降级 LED 结果的对比

而 66 号被测 LED 器件，即使只进行了 500 小时的老化测试，从图中可知，结-环境的热阻几乎增加了一倍，通过结构函数曲线可知，是由于 MCPCB 板出现了分层造成的，这意味着 66 号被测 LED 器件的封装过程中，MCPCB 板的质量无法抵抗老化测试的要求，

需要对 MCPCB 板进行改善。

如果没有瞬态热测试设备，只放置在积分球中进行光学属性的测试，那么只能发现光通量出现了急剧的下降，但是究竟被测 LED 器件封装内部什么区域发生了降级，却一无所知。通过瞬态热测试得到的结构函数曲线，可以很好地识别在可靠性测试中，被测 LED 器件发生的降级情况，并依此做出相应的改善。

4. 不同的 LED 器件 LM80 老化测试结果对比

现在有 4 个供应商的 8 个被测 LED 器件，进行老化测试，到目前为止进行了 4000 小时的老化时间。其中有一个供应商的样品，在只进行了 500 小时的老化测试后，光通量就发生了急剧的下降。因此对这个被测 LED 器件，在可靠性测试中进行瞬态热测试，通过结构函数判断被测 LED 器件的降级区域，如图 6-65 所示。

通过结构函数曲线可知，被测 LED 器件的封装内部并没有发生任何的变异，而发光效率的下降是由于 TIM 材料随着老化实验的进行，引起热阻增加造成的。

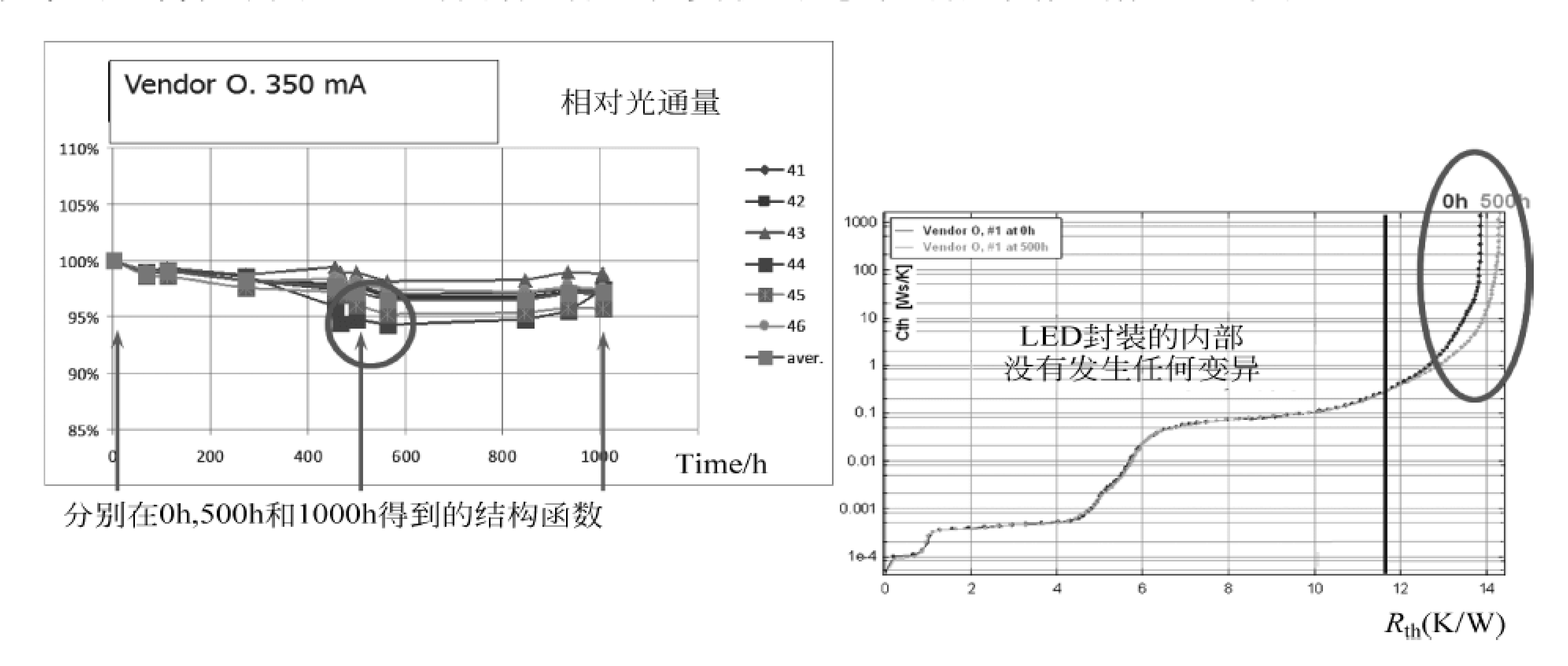


图 6-65　结构函数曲线显示被测 LED 器件降级的区域

思考题

1. 为何 pn 结的正向电压与温度近似为线性关系？说明理由。

2. 什么是 K 系数？为何必须在小电流下测试？

3. 什么是稳态测试法？说明主要特点。

4. 什么是瞬态热测试法？其中的“动态法”和“静态法”的原理分别是什么？各自的特点是什么？

5. 为何使用瞬态法可以测得 LED 器件的各层热特性？试说明基本原理。稳态法可以吗？为什么？

6. 什么是散热路径的结构函数曲线？如何得到的？

7. 请思考在实际的热测量中结构函数曲线有何用途。举例说明。

8. 瞬态热测试法可以用于 LED 之外的热系统测试吗？原因是什么？有何限制？

9. 使用静态的“平板法”和瞬态法分别设计两套实验方案测试导热脂的热导率，讨论各自的特点。

第7章 LED器件瞬态热测试的实际操作

本章以已经商品化的热测试设备——T3Ster 系统为例，以大功率 LED 器件为测试对象，介绍实际的 LED 器件瞬态热测试的操作步骤，以及如何使用设备的测试分析软件 T3Ster-Master 对被测 LED 器件瞬态热测试的原始曲线进行分析和评估。

7.1 瞬态热测试需要的准备工作

被测 LED 器件以及实物的连线图如图 7-1 所示，LED 器件是一个 COB 封装的大功率器件。



图 7-1 被测 LED 器件以及实物连线图

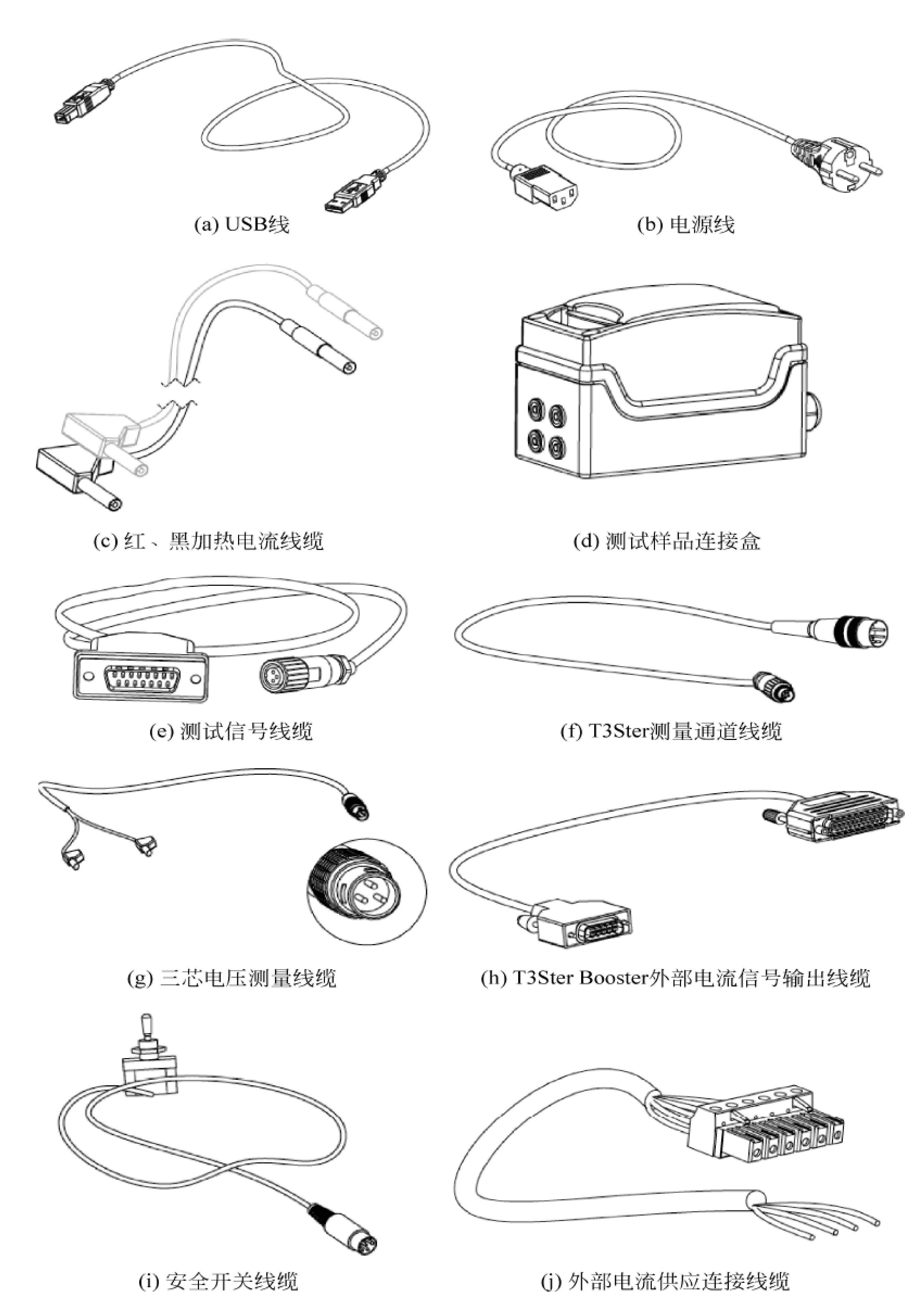
7.1.1 T3Ster 系统的安装和接线

(1) 所需的线缆和附件如图 7-2 所示。

(2) 将外部电流供应连接线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 背面板的 External Power Supply Connector 端口，另一端连接至外部电源(如安捷伦电源 N5770A)的电流输出端口，如图 7-3 所示。

(3) 将 T3Ster Booster 外部电流信号输出线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 背面板的 Digital Control Interface 端口，另一端连接至外部安捷伦电源 N5770A 的端口，如图 7-4 所示。

(4) 将测试信号线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 的 PWR SIGNAL 端口，另一端连接至 T3Ster Mainsys 测量主机的 R-DRIVER 的端口上，如图 7-5 所示。



(a) USB线

(b) 电源线

(c) 红、黑加热电流线缆

(d) 测试样品连接盒

(e) 测试信号线缆

(f) T3Ster测量通道线缆

(g) 三芯电压测量线缆

(h) T3Ster Booster外部电流信号输出线缆

(i) 安全开关线缆

(j) 外部电流供应连接线缆

图 7-2　测试所需的线缆和附件

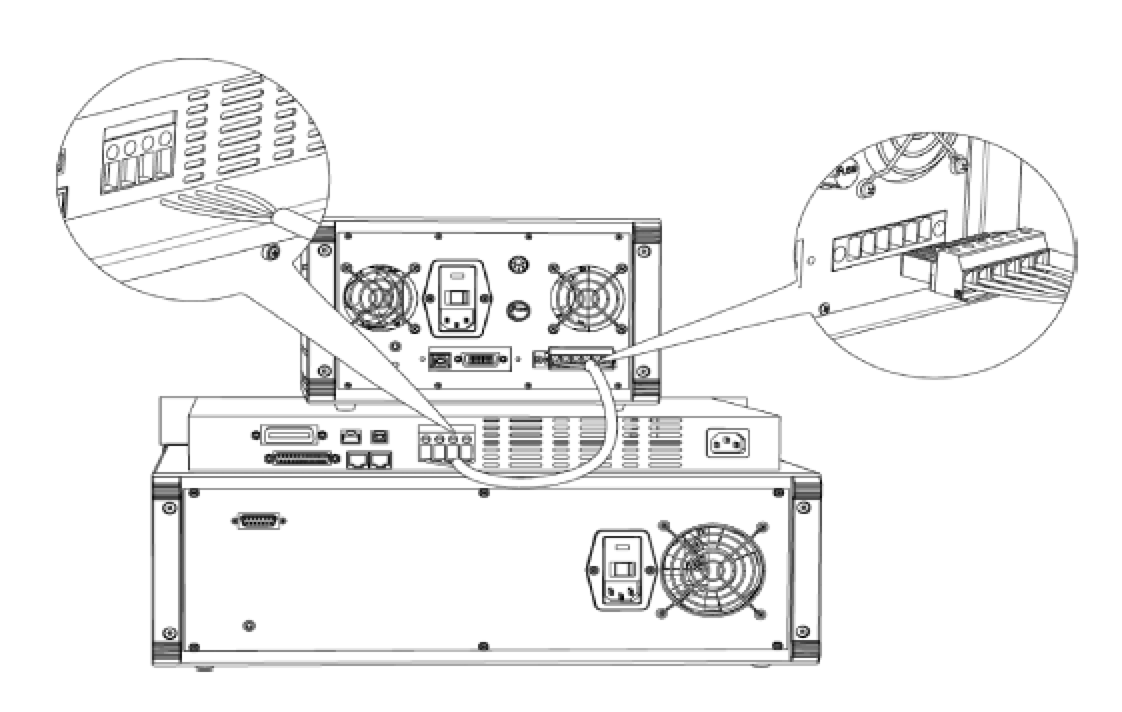


图 7-3 外部电流供应连接线缆的连接

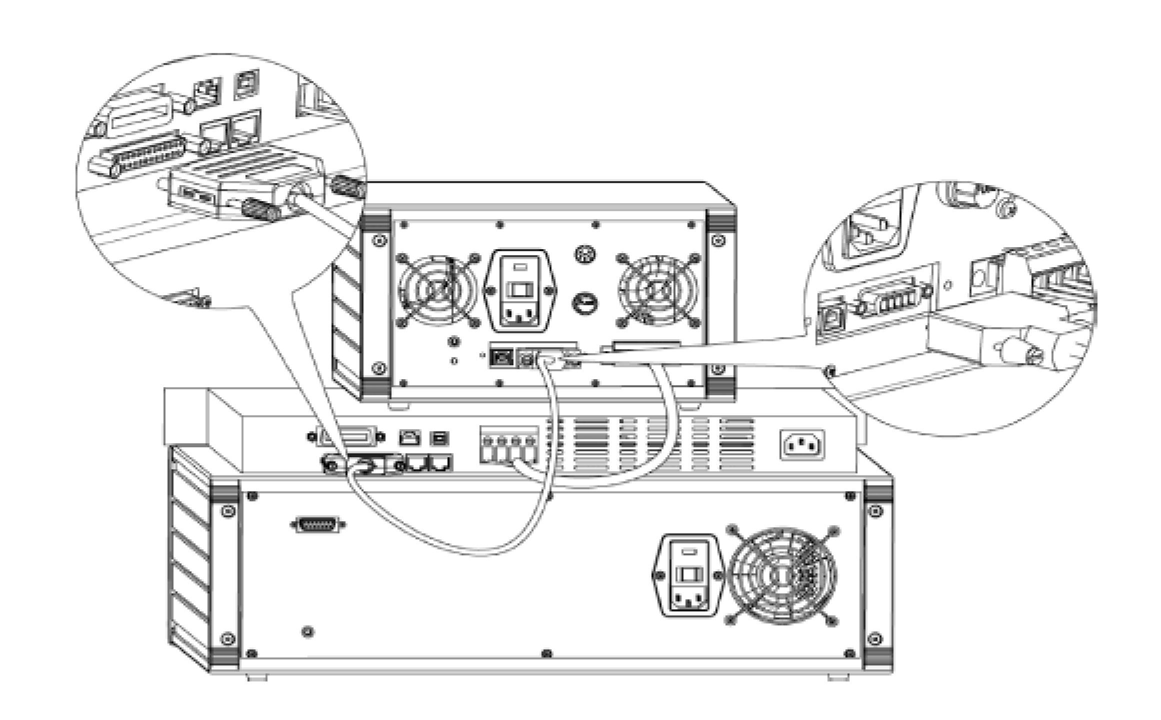


图 7-4 T3Ster Booster 外部电流信号输出线缆的连接

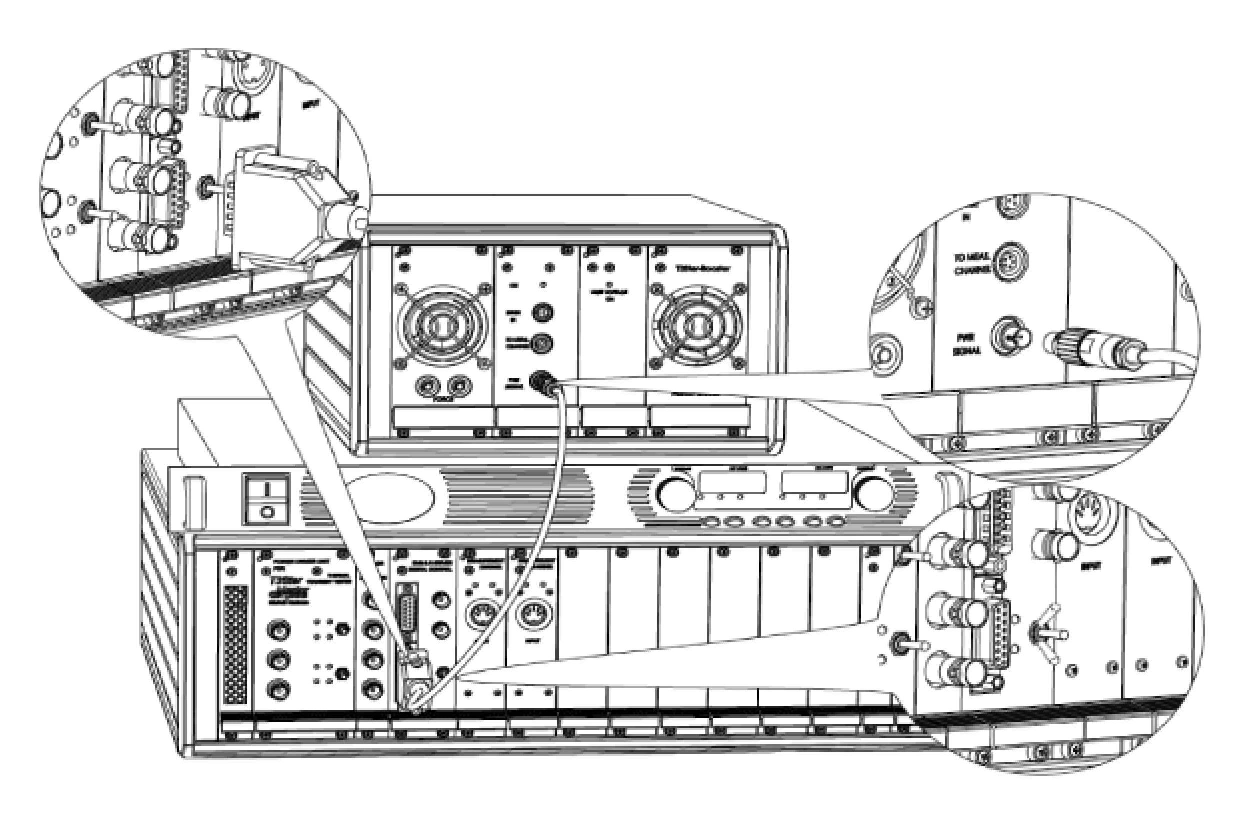


图 7-5 测试信号线缆的连接

(5) 将 T3Ster 测量通道线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 的 TO MEAS. CHANNEL 端口，另一端连接至 T3Ster Mainsys 测量主机的测试通道上，如图 7-6 所示。

(6) 将三芯电压测量线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 的 SENSE IN 端口，另一端连接至被测器件连接盒上的端口，如图 7-7 所示。

(7) 将红、黑加热电流线缆的一端连接至 10A/150V T3Ster Booster 的 FORCE 端口，一端连接至测试样品连接盒的端口，如图 7-8 所示。

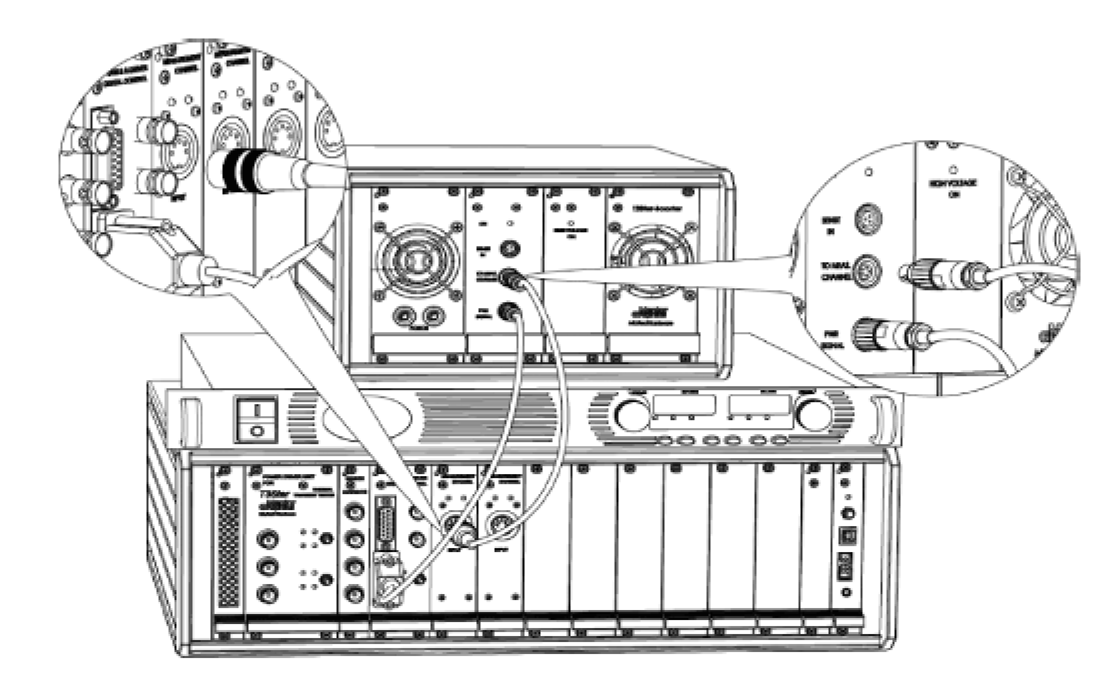


图 7-6　T3Ster 测量通道线缆的连接

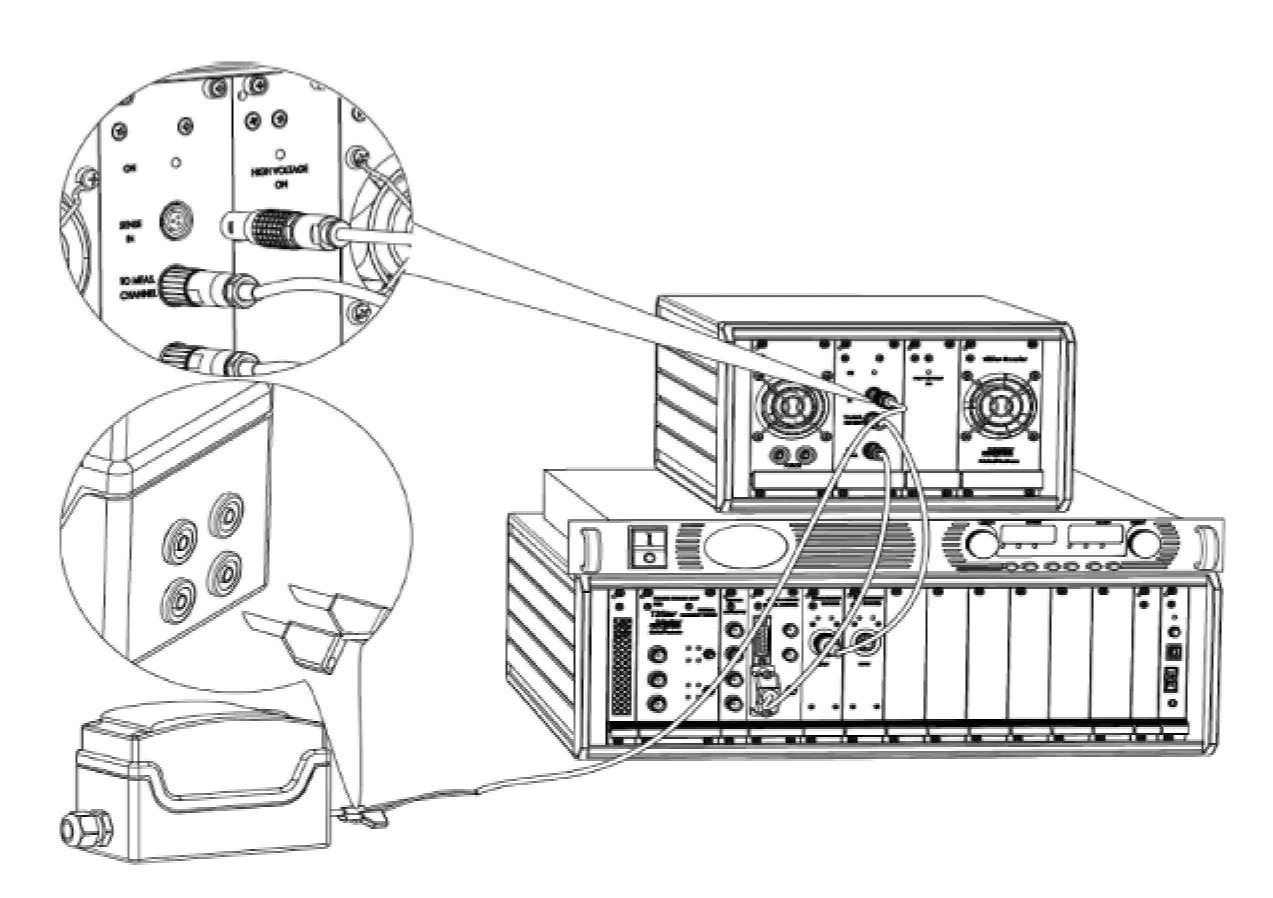


图 7-7　三芯电压测量线缆的连接

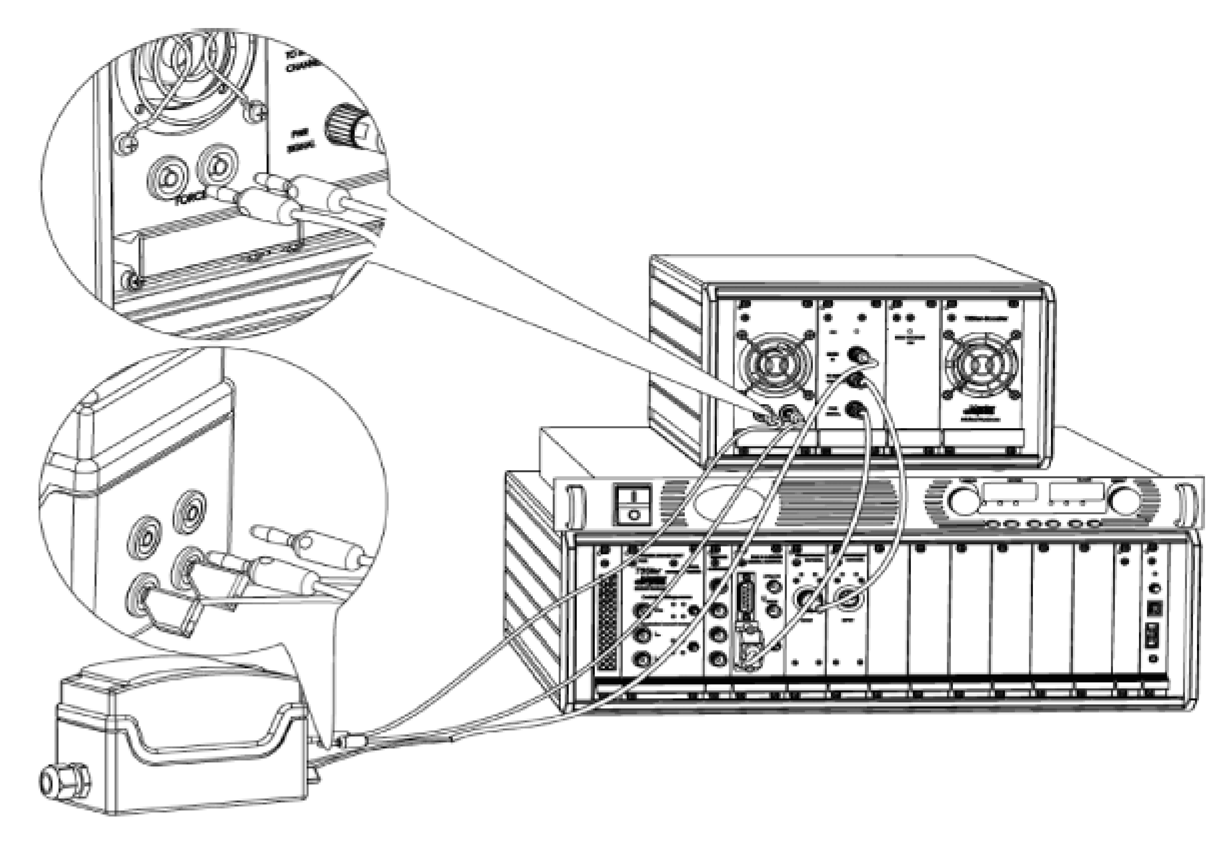


图 7-8　红、黑加热电流线缆的连接

（8）将安全开关线缆连接至 10A/150V T3Ster Booster 背面板的端口上，如图 7-9 所示。

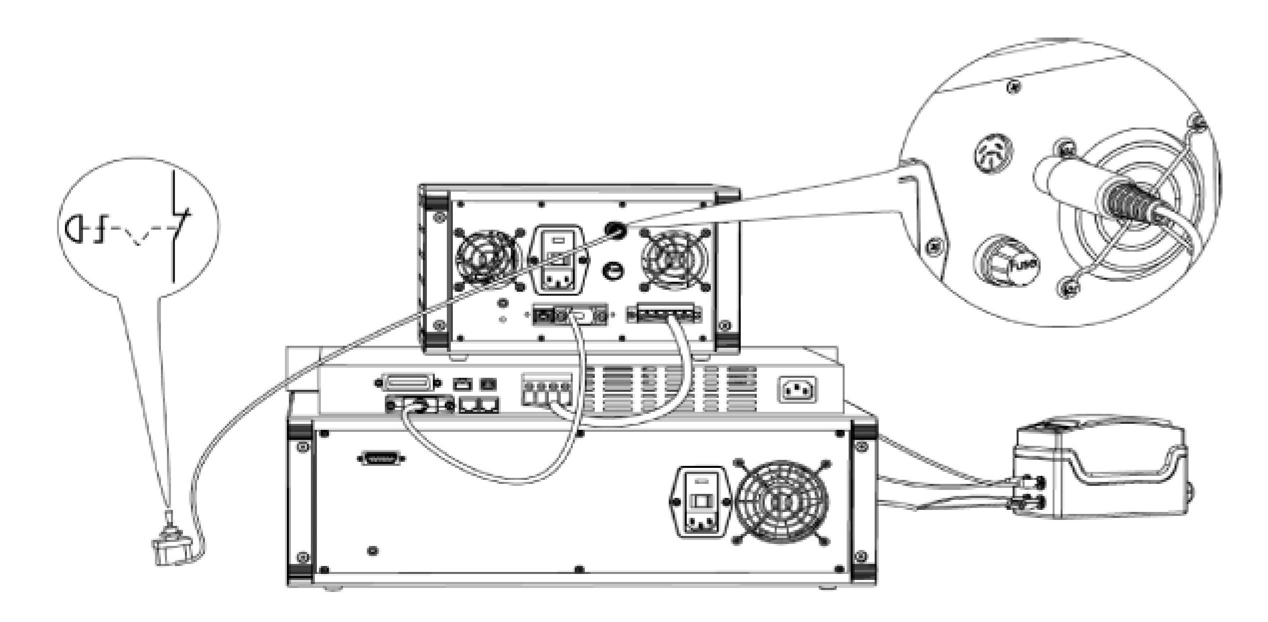


图 7-9　安全开关线缆的连接

（9）用 USB 线缆将 10A/150V T3Ster Booster、T3Ster Mainsys 测量主机以及外接的安捷伦电源 N5770A 连接至控制计算机上，如图 7-10 所示。

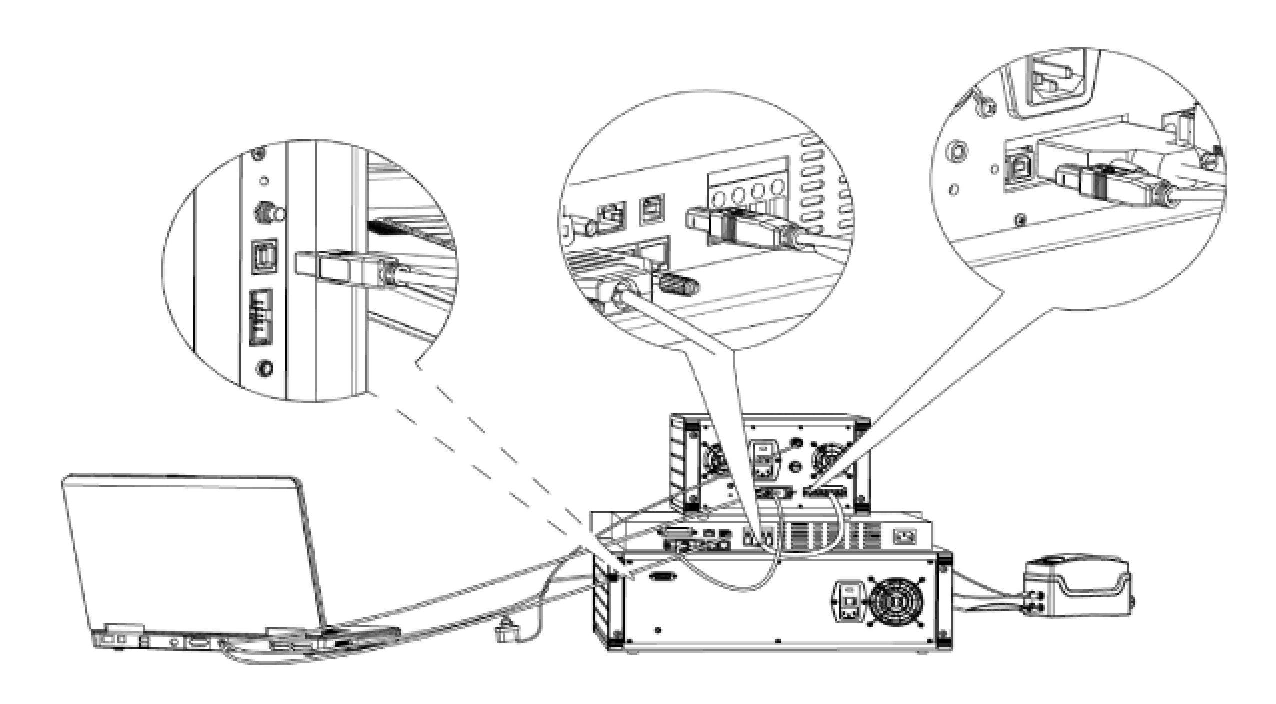


图 7-10　USB 线缆的连接

（10）用扁平地线将 10A/150V T3Ster Booster 和 T3Ster Mainsys 测量主机连接起来，如图 7-11 所示。

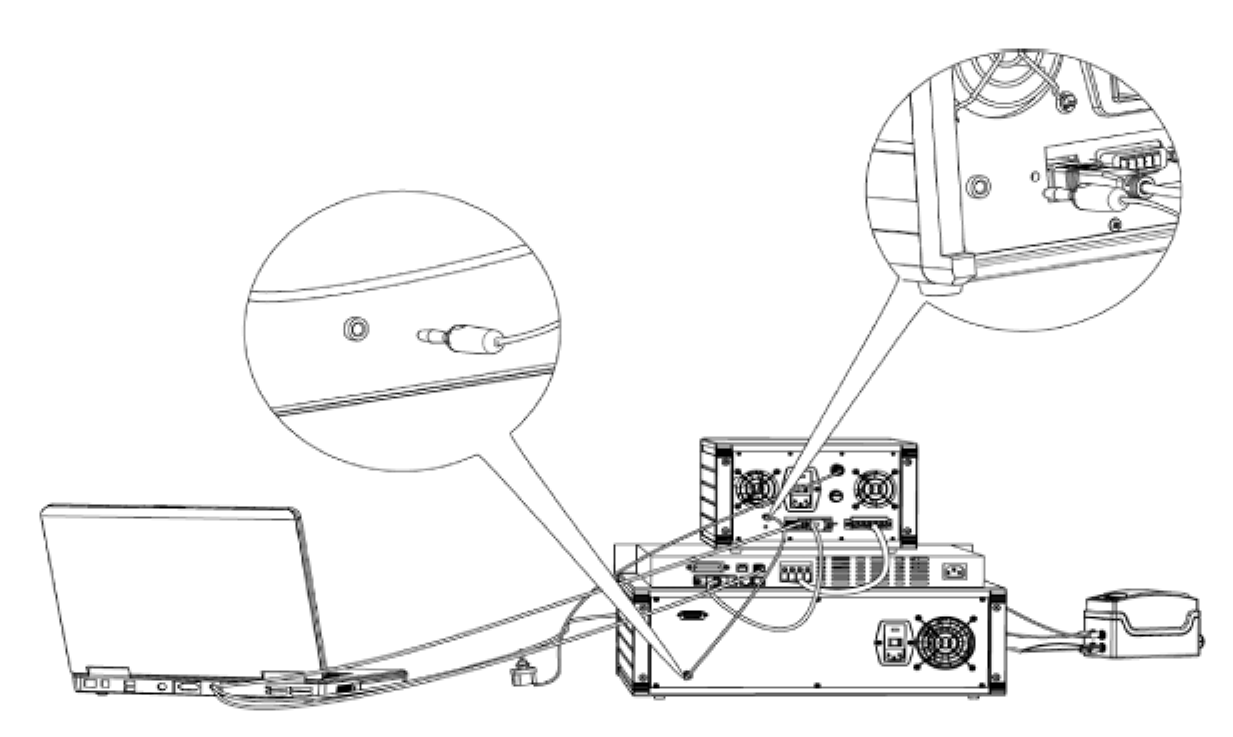


图 7-11　扁平地线的连接

(11) 将各个部分的设备通过电源线连接到电力系统,如图 7-12 所示。

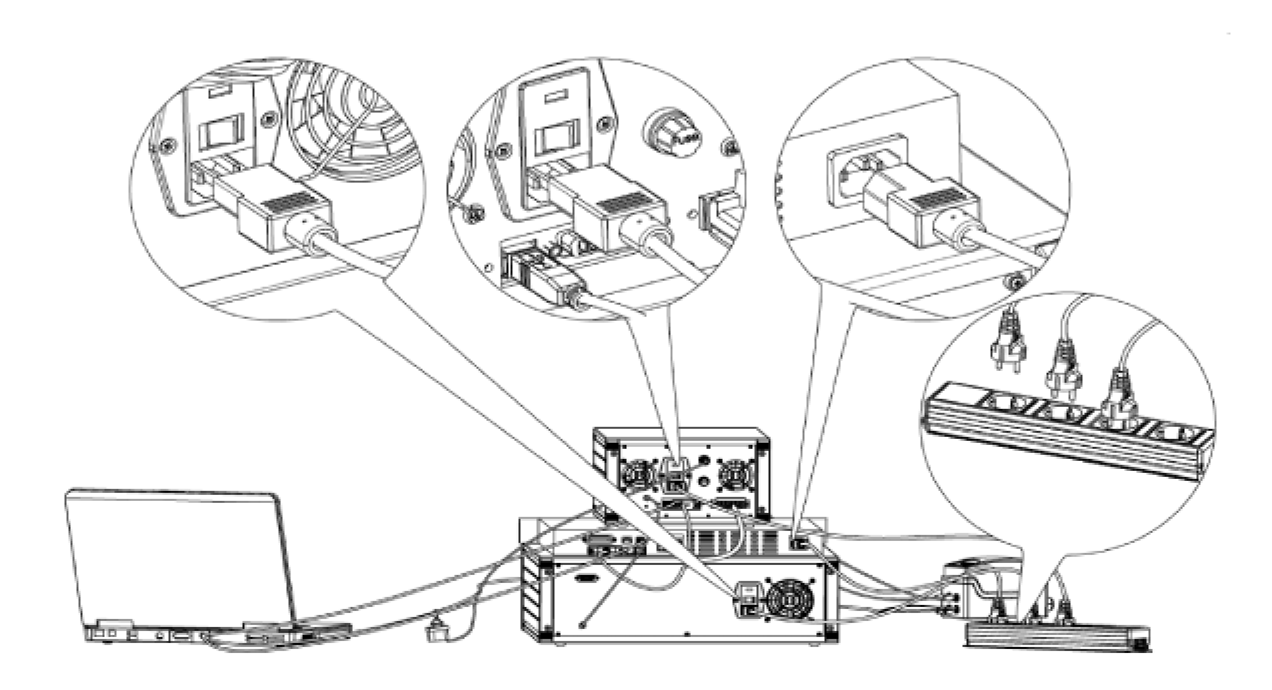


图 7-12　电源线的连接

7.1.2　被测 LED 器件的安装与连线

将被测 LED 器件通过测试样品连接盒连接到 T3Ster 系统上,如图 7-13 所示。

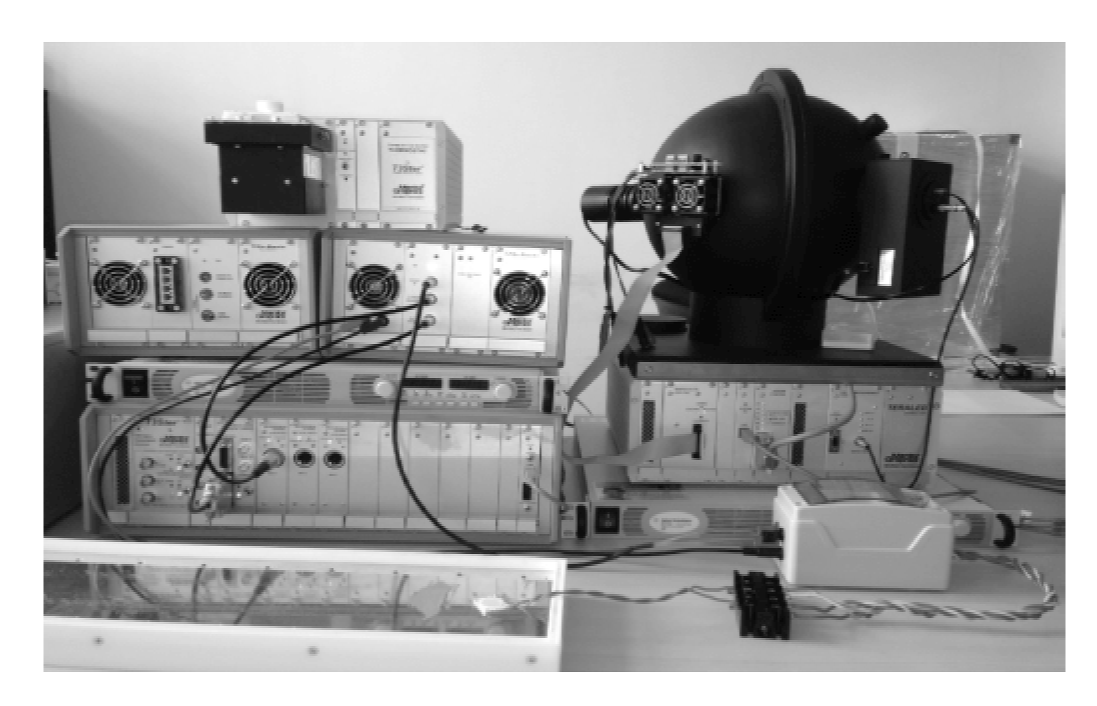


图 7-13　被测 LED 器件通过测试样品连接盒连接到 T3Ster 系统上

将被测 LED 器件通过导热硅脂粘贴在控温的冷板上,如图 7-14 所示。

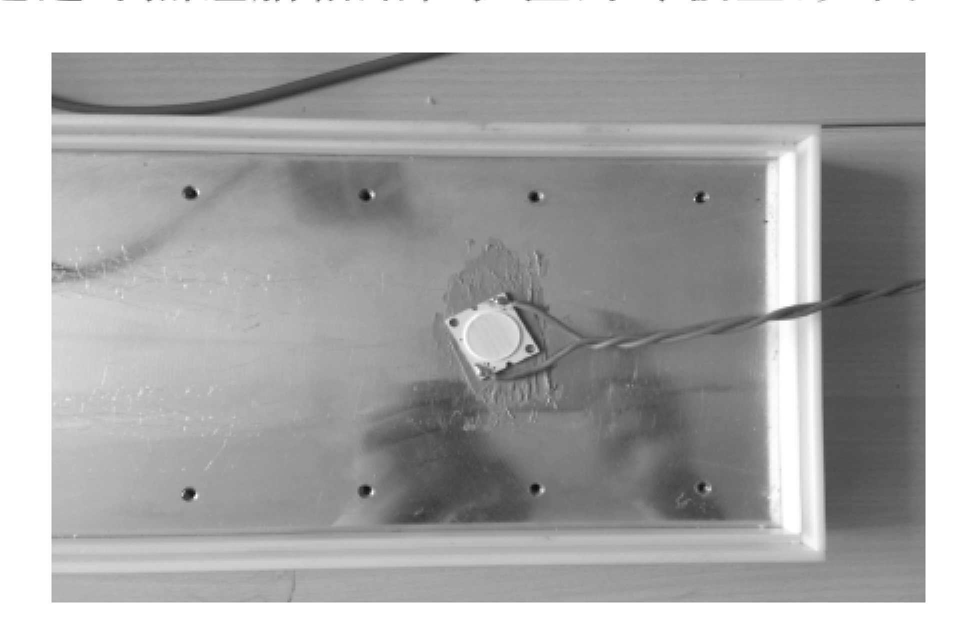


图 7-14　被测 LED 器件粘贴在冷板上

7.2 LED 器件的瞬态热测试

将被测 LED 器件连接到 T3Ster 系统，并通过导热硅脂粘贴在控温的冷板上后，就可以进行瞬态热测试了。

7.2.1 LED 器件温度敏感参数的测量和校准

单击 T3Ster 系统控制软件的快捷方式，打开 T3Ster 系统的控制软件，如图 7-15 所示。



图 7-15　T3Ster 系统控制软件的启动界面

T3Ster 系统控制软件启动后，软件首先检查是否存在指定的设备驱动程序及 T3Ster 系统的各个部分的硬件。若控制软件没有找到设备驱动程序或各个部分的硬件（如存在设备驱动程序安装问题或硬件没有打开），则屏幕右下角提示为 NOT CONNECTED（未连接）；其他情况则显示 CONNECTED（已连接）。

T3Ster 系统控制软件成功地找到硬件后，单击图 7-16 所示图标，在出现的 Select Configuration 对话框中，选择 T3STER-BOOSTER 选项，并单击 OK 按钮，完成设置。

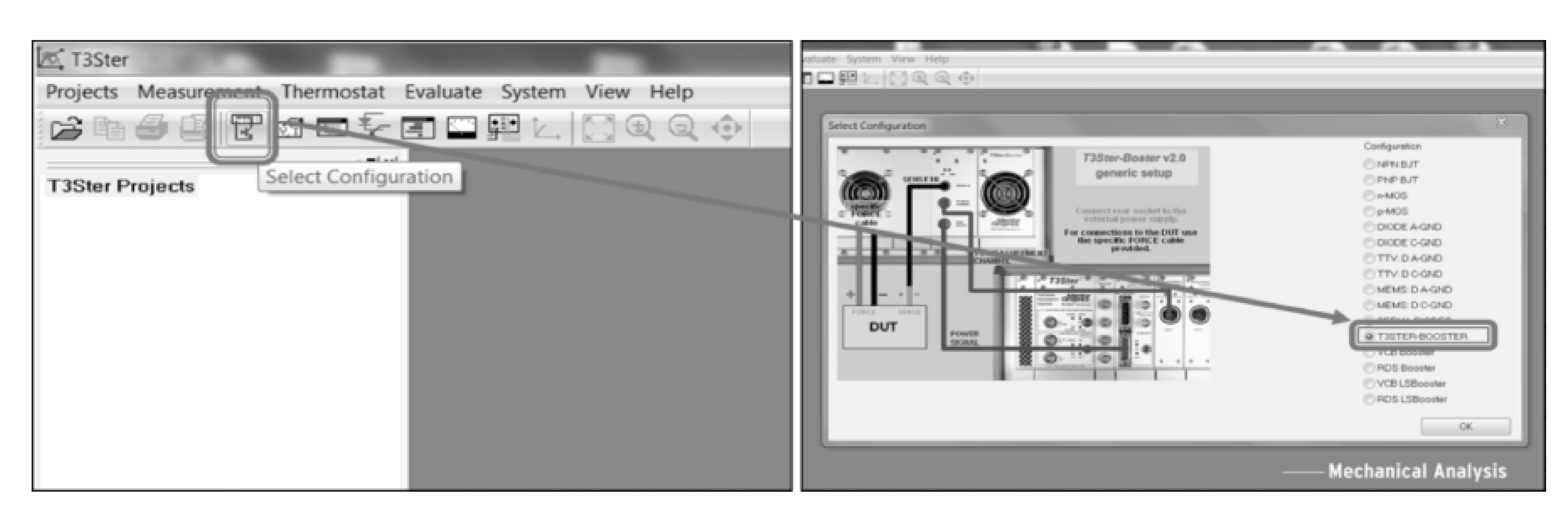


图 7-16　Select Configuration 对话框的设置

完成设置后，单击图 7-17 所示的图标，出现 Booster Plugin Startup 对话框，其中会显示 T3Ster Mainsys 测量主机的测量通道数目、外接的安捷伦电源的信息以及 T3Ster Booster 的型号和信息。如确认无误，请单击 OK 按钮，完成设置。如果出现错误，请重新确认 T3Ster 系统的安装和接线是否正确。

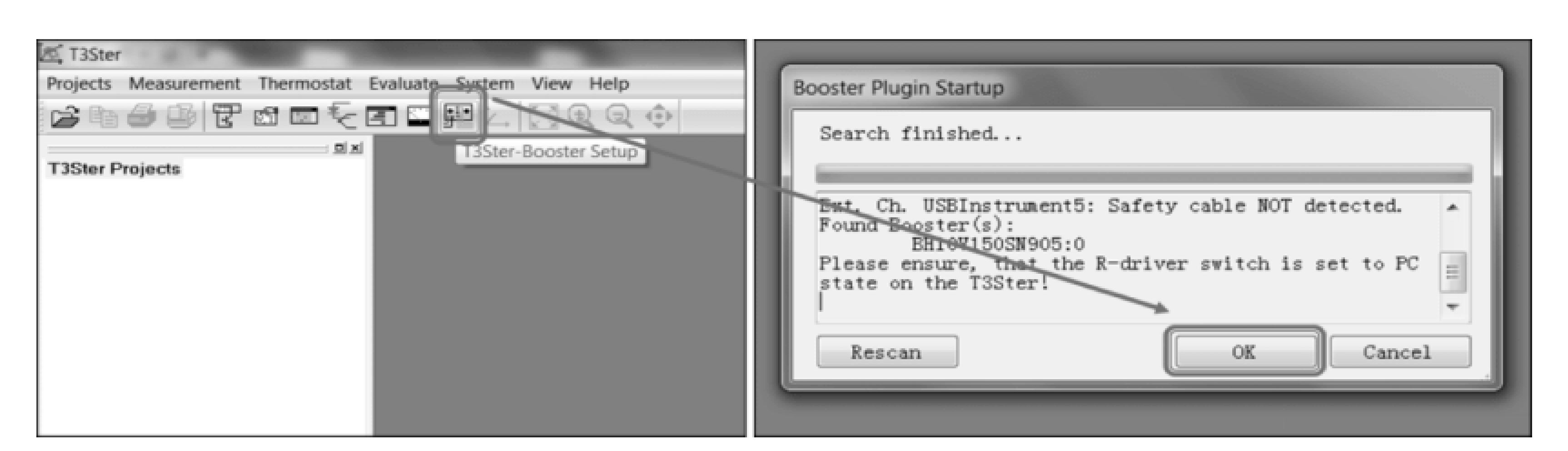


图 7-17　Booster Plugin Startup 对话框的设置

单击 OK 按钮，出现 T3Ster Booster Plug-in Setup 对话框，选择 Advanced Measurement 选项卡，进行设置，如图 7-18 所示。

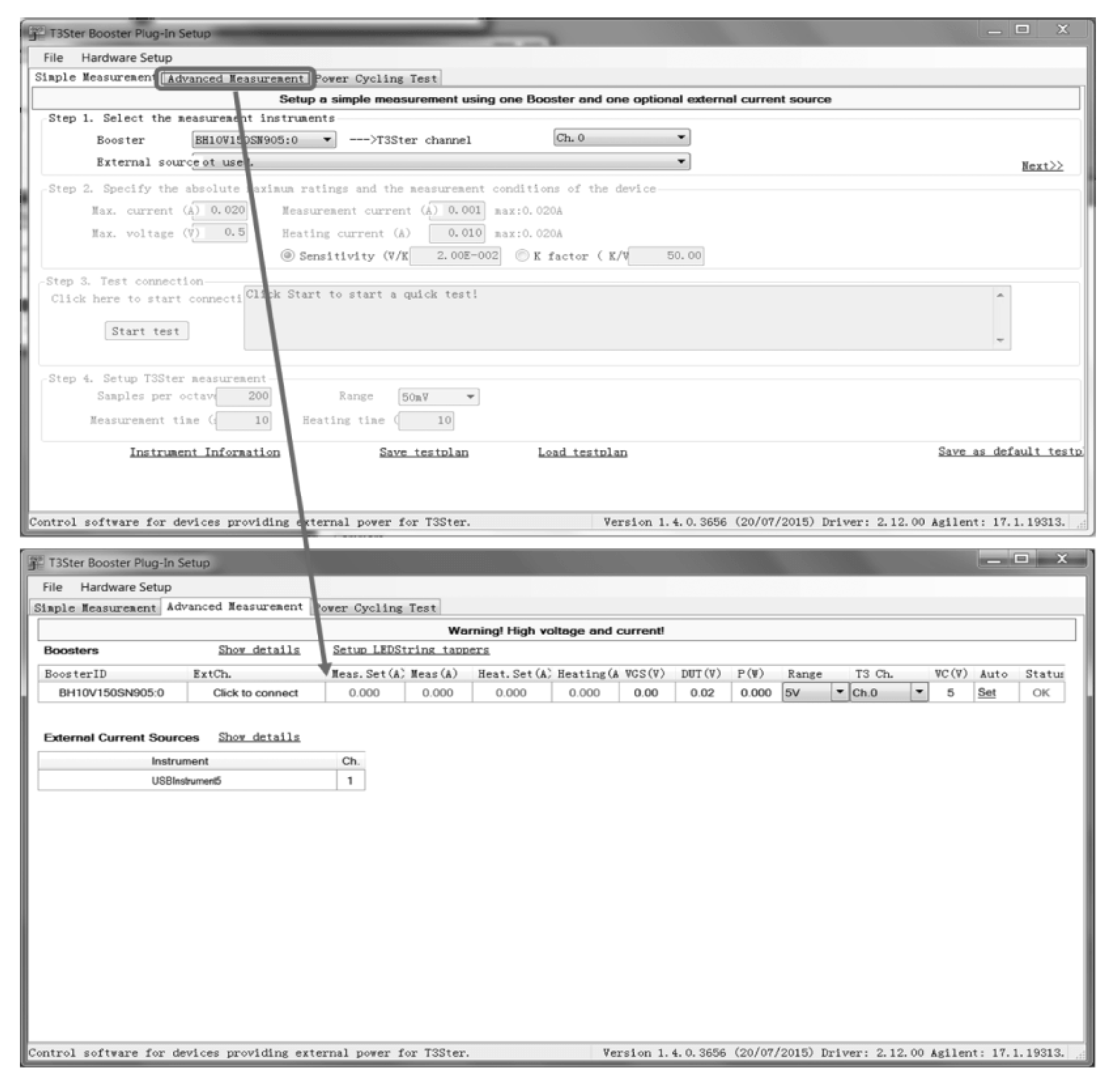


图 7-18　Advanced Measurement 选项卡

如果被测 LED 器件的加热电流大于 200mA，则单击 Click to connect 按钮，出现 Attach External Instrument Channel 对话框，在其中选择相应的安捷伦电源即可，如图 7-19 所示。

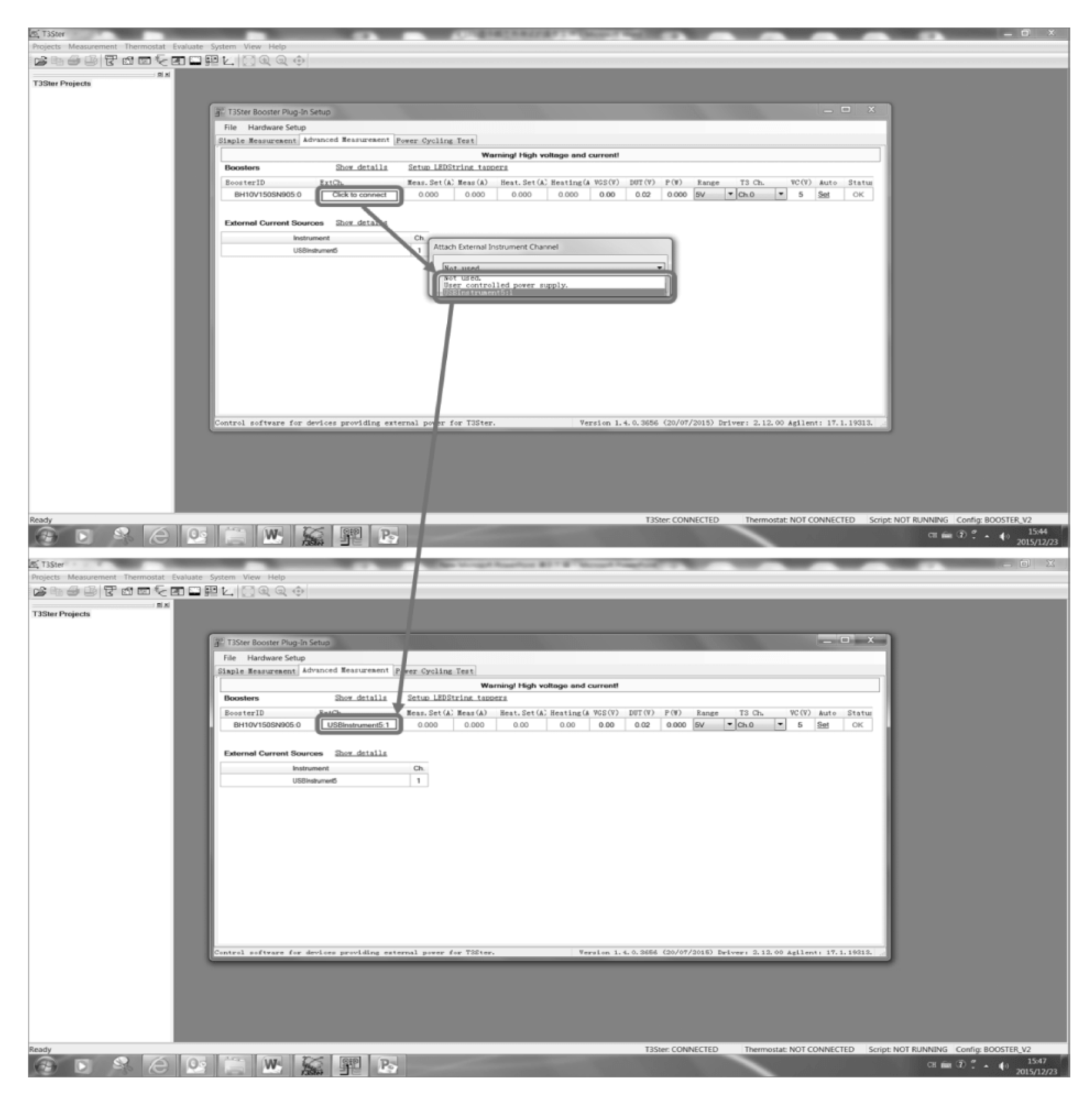


图 7-19 外接安捷伦电源的连接

外接安捷伦电源连接完成后，单击 Range 下拉列表，选择被测 LED 器件的电压范围，此例中被测 LED 器件的正向电压在 700mA 加热电流情况下，大约为 30V，因此选择 40V 的档位，如图 7-20 所示。

从 T3 ch 下拉列表中选择与实际的测试主机 T3Ster-Mainsys 相连接的测试通道，此例中，与测试通道 0 相连接，因此选择 ch. 0，如图 7-21 所示。

在 VC(V)栏中输入允许输出的最高电压值。VC(V)的意思是 Voltage Corner(V)，是指允许施加到被测 LED 器件上的最高电压。如果超过 VC(V)设置的电压值，则电流

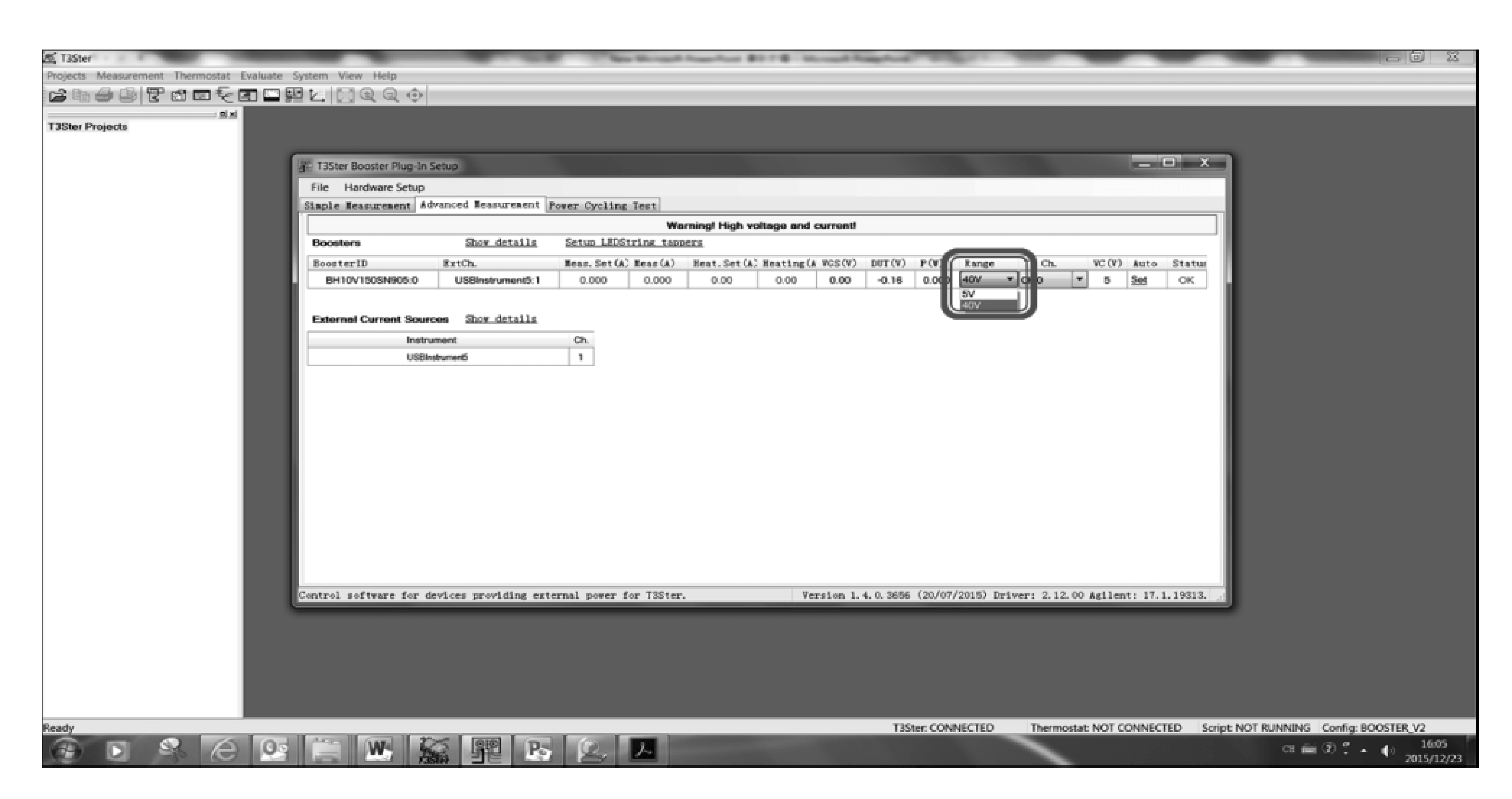


图 7-20　被测 LED 器件电压范围的选择

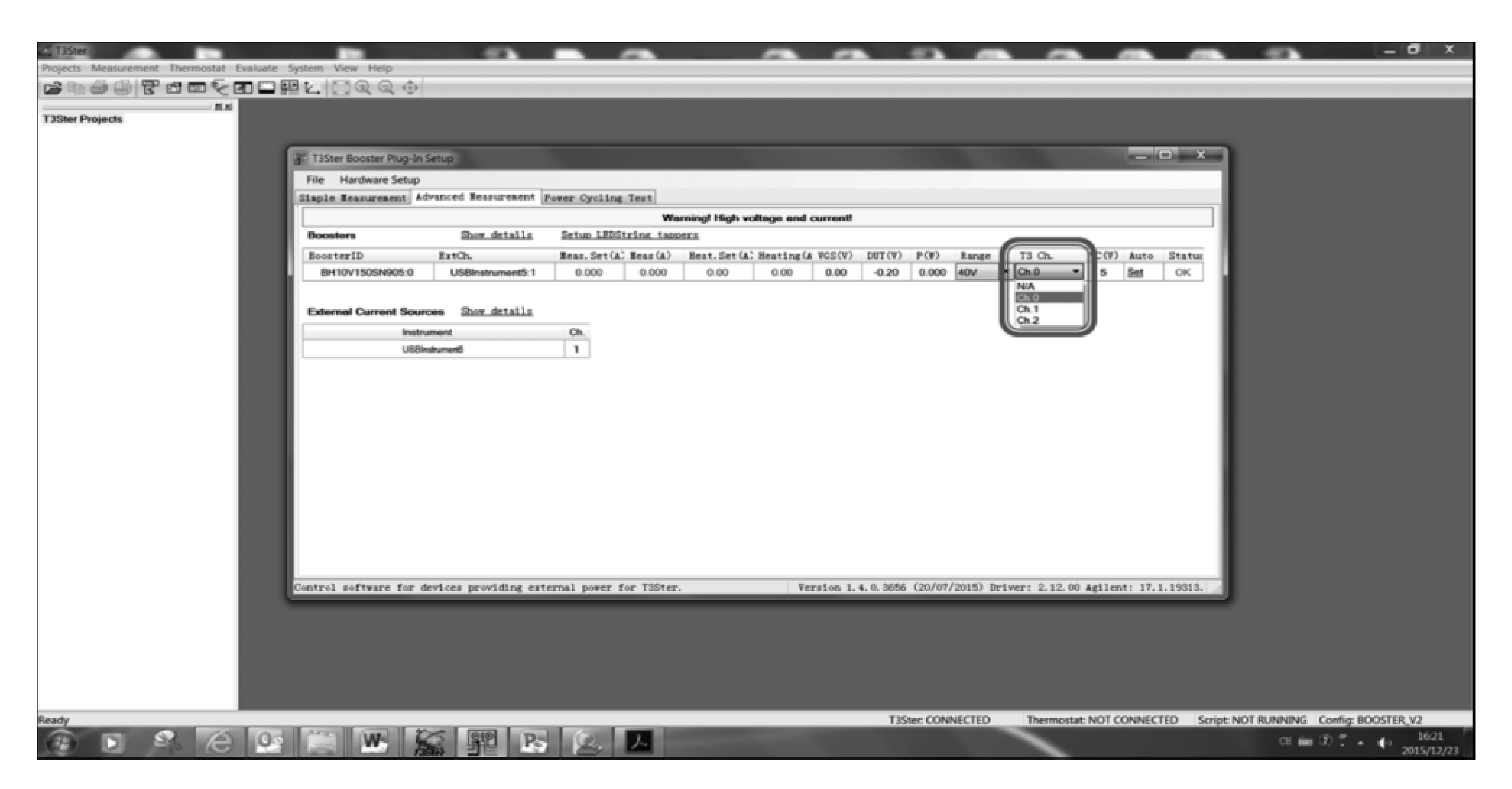


图 7-21　测量通道的选择

不能输出到被测 LED 器件上，起到保护作用。此例中被测 LED 器件在 700mA 加热电流情况下，电压大约为 30V，因此可以输入 35V 的 VC(V)数值，如图 7-22 所示。

当项目 VC(V)设置完成后，在外接安捷伦电源的前面板上，DC VOLTS 将显示此电压值，如图 7-23 所示。

在 Meas. Set(A)栏中输入测试电流，即当前施加到被测 LED 器件上的测试电流值，此例中，输入的测试电流为 5mA，如图 7-24 所示。

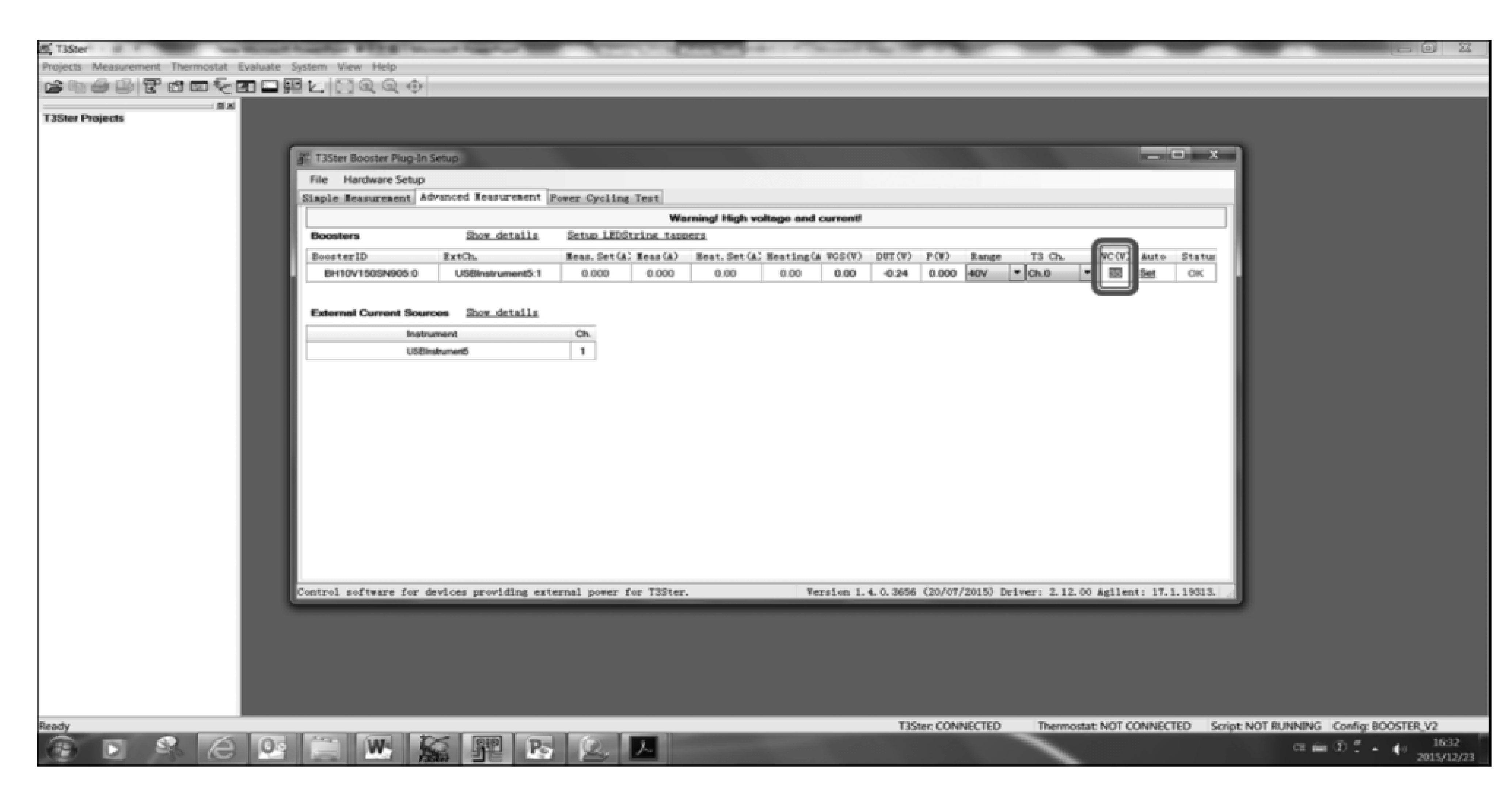


图 7-22　VC（V）的设定



图 7-23　外接安捷伦电源上 DC VOLTS 的显示

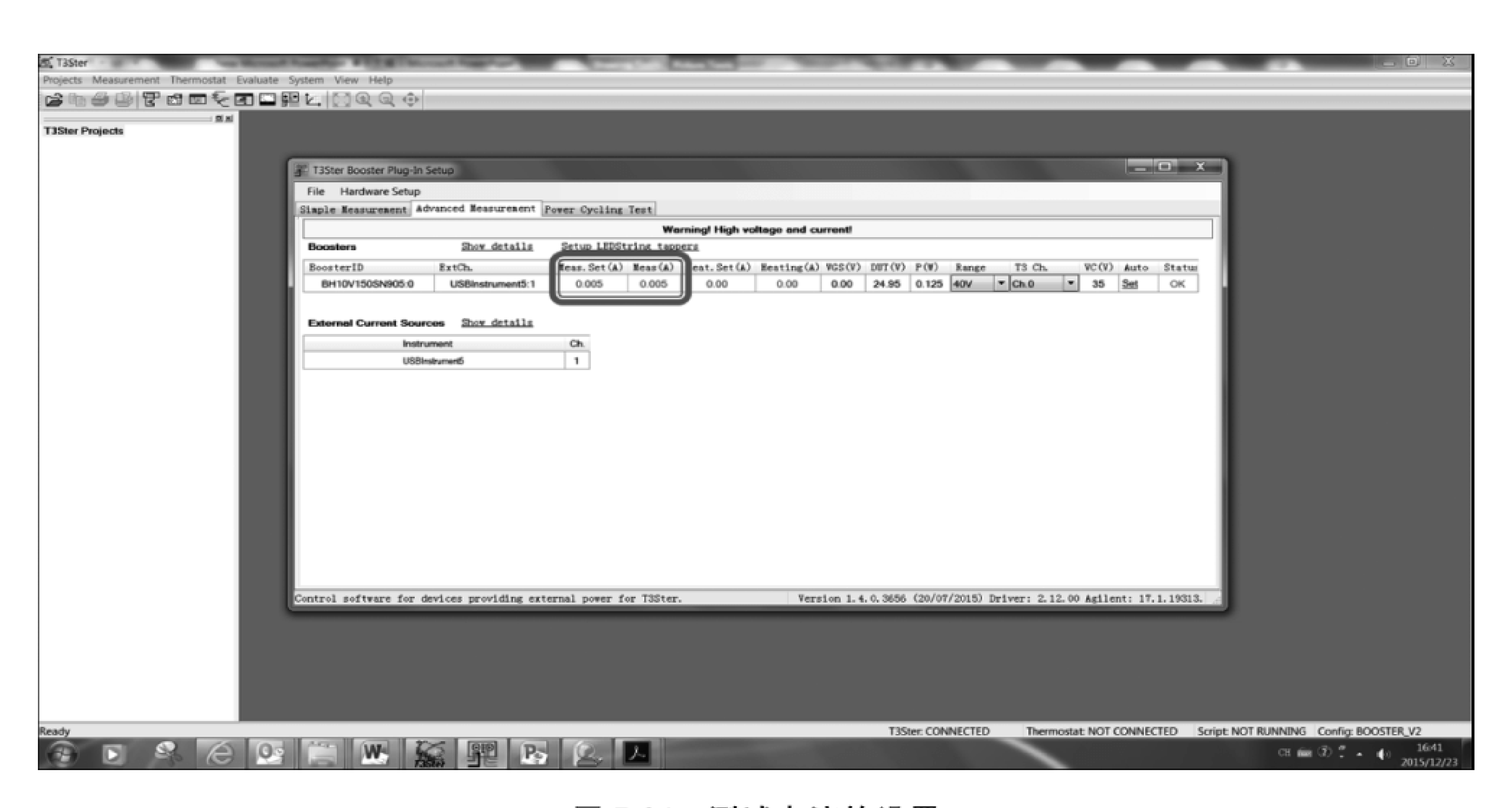


图 7-24　测试电流的设置

测试电流设置完成后，在 DUT (V)栏中显示出被测 LED 器件当前的电压值，在 P (W)栏中显示被测 LED 器件当前施加的功率值，如图 7-25 所示。

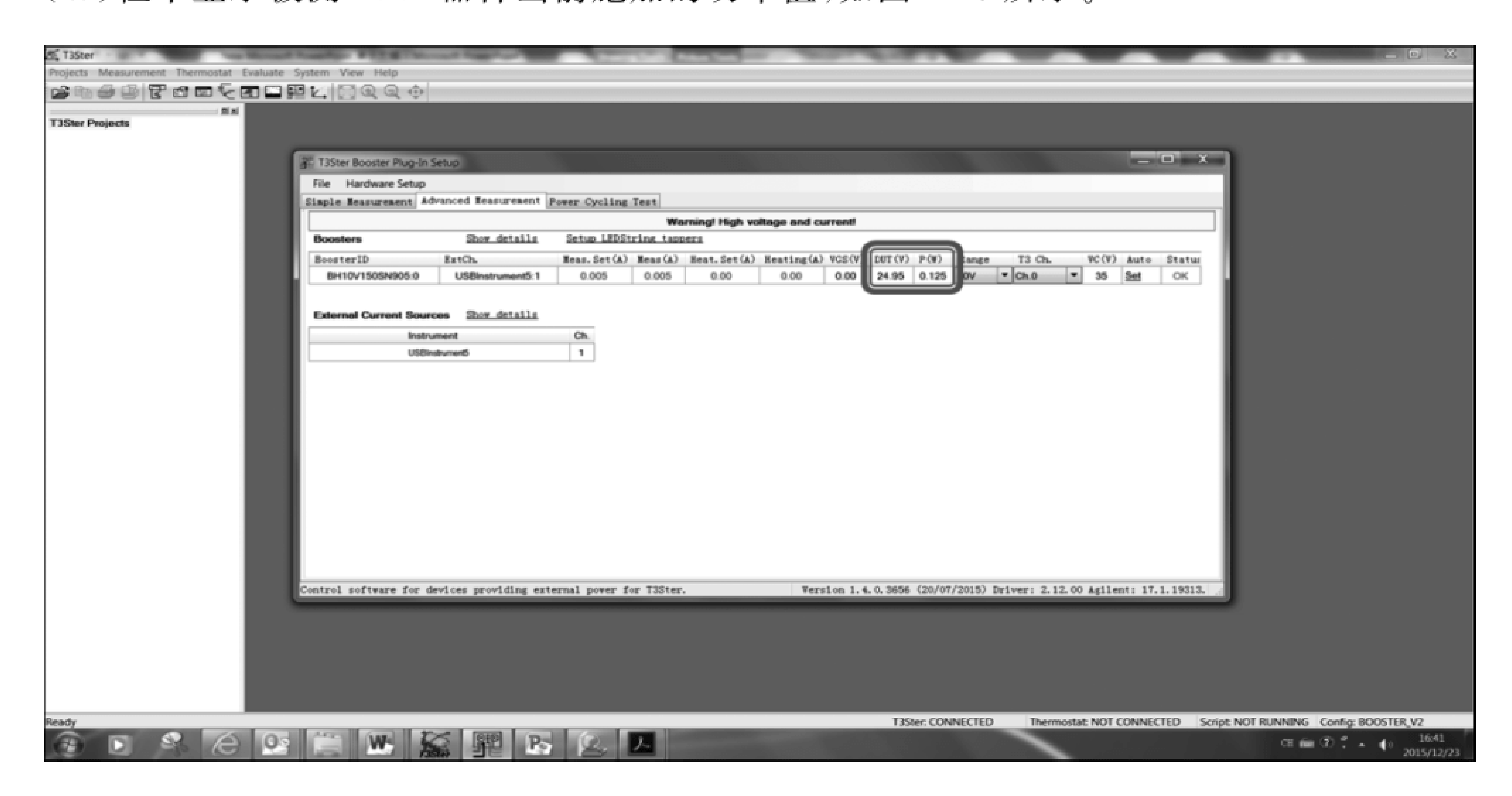


图 7-25　被测 LED 器件当前的电压值以及施加的功率

在 Heat. Set(A)栏中输入加热电流，在被测 LED 器件的加热阶段，Heating (A)栏将显示出施加到被测 LED 器件上的加热电流值，此例中，输入的加热电流为 700mA，此时被测 LED 器件还没有施加加热电流，因此 Heating (A)栏显示为 0，如图 7-26 所示。

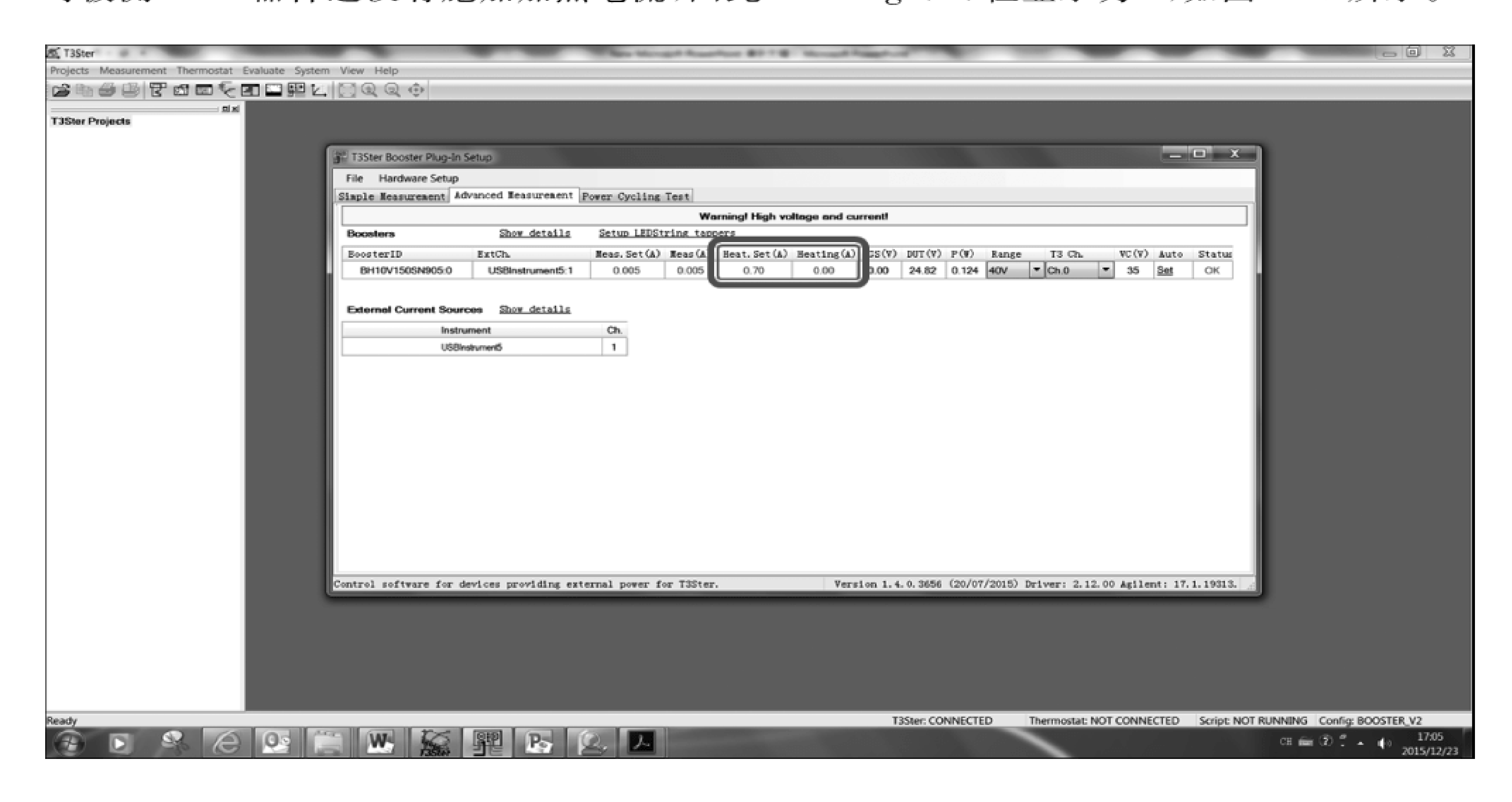


图 7-26　加热电流的设置

依次打开 T3Ster 系统控制软件的 Set Measurement Parameters、Set Measurement Channels、Channel Attributes 及 Single Voltage Measurement 对话框，如图 7-27 所示。

在 Set Measurement Parameters 对话框内，输入被测 LED 器件的加热时间和测试时间，单击 Powering 栏 off/on 按钮，然后单击 Update 按钮，输入的参数将会被传送到硬件。此时，测试电流已经输出到被测 LED 器件，被测 LED 器件有光输出，如图 7-28 所示。

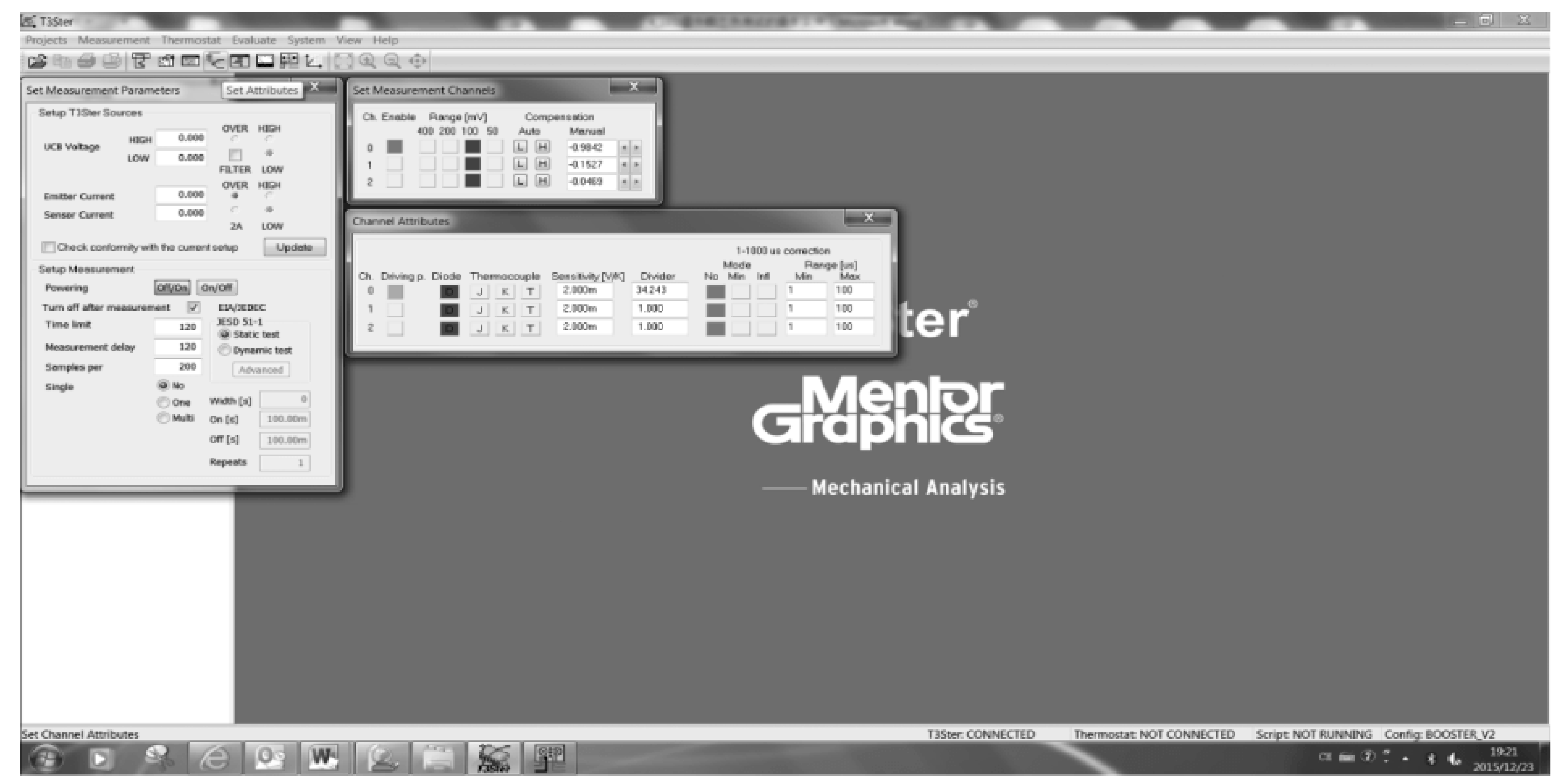


(a) Set Measurement Parameters对话框

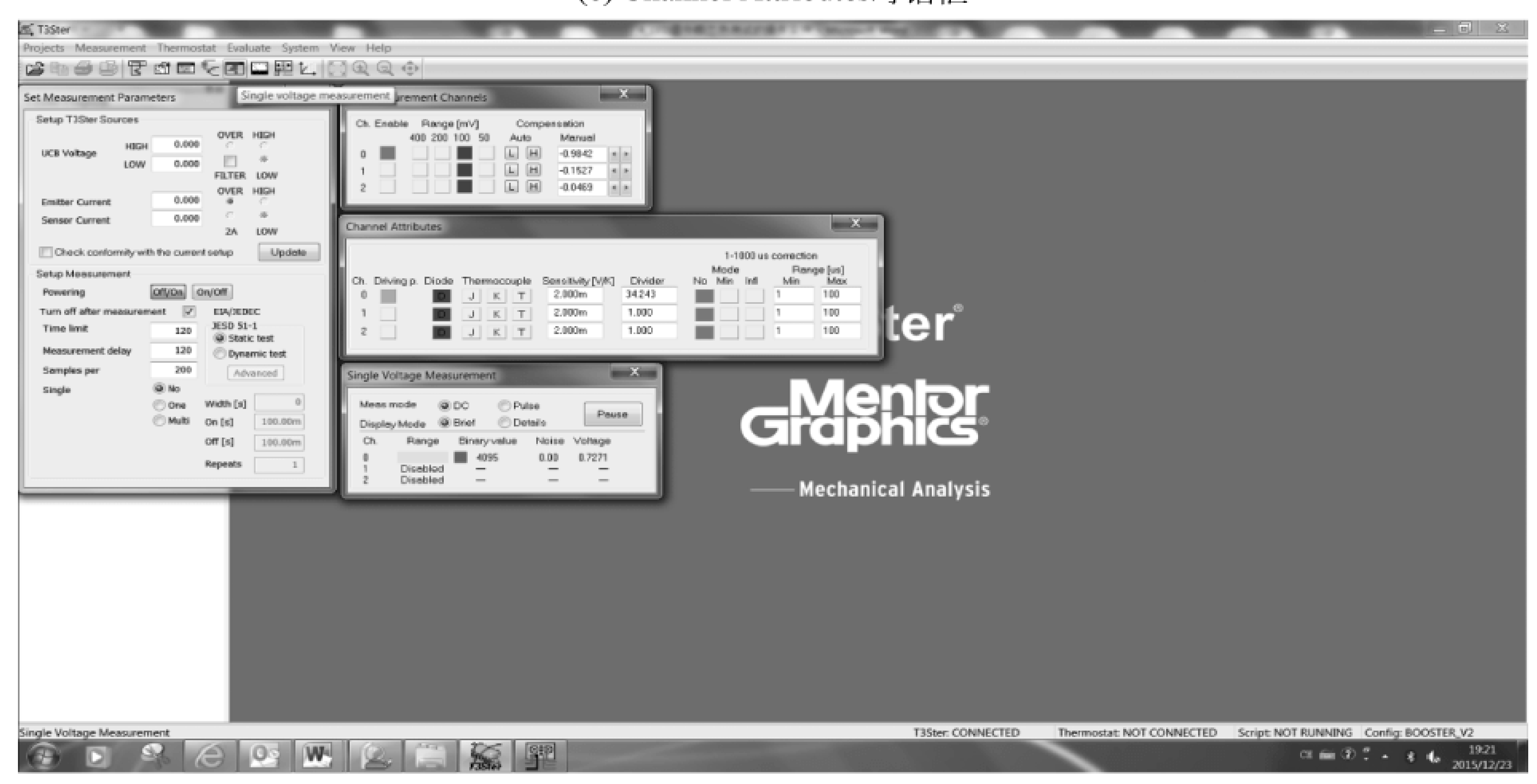


(b) Set Measurement Channels对话框

图 7-27　打开 T3Ster 系统控制软件的选项



(c) Channel Attributes对话框



(d) Single Voltage Measurement对话框

图 7-27 （续）

在 Set Measurement Channels 对话框（图 7-29）的 Ch. Enable 栏中激活 Channel 0，激活的测试通道显示为绿色；在 Range[mV]栏中选择合适的测量范围，此例中选择 100mV 的档位。

此时，Single Voltage Measurement 对话框中表示 Range 的栏目上出现表示量程的颜色栏，出现红色表示当前的量程设置出现溢出，如图 7-30 所示。

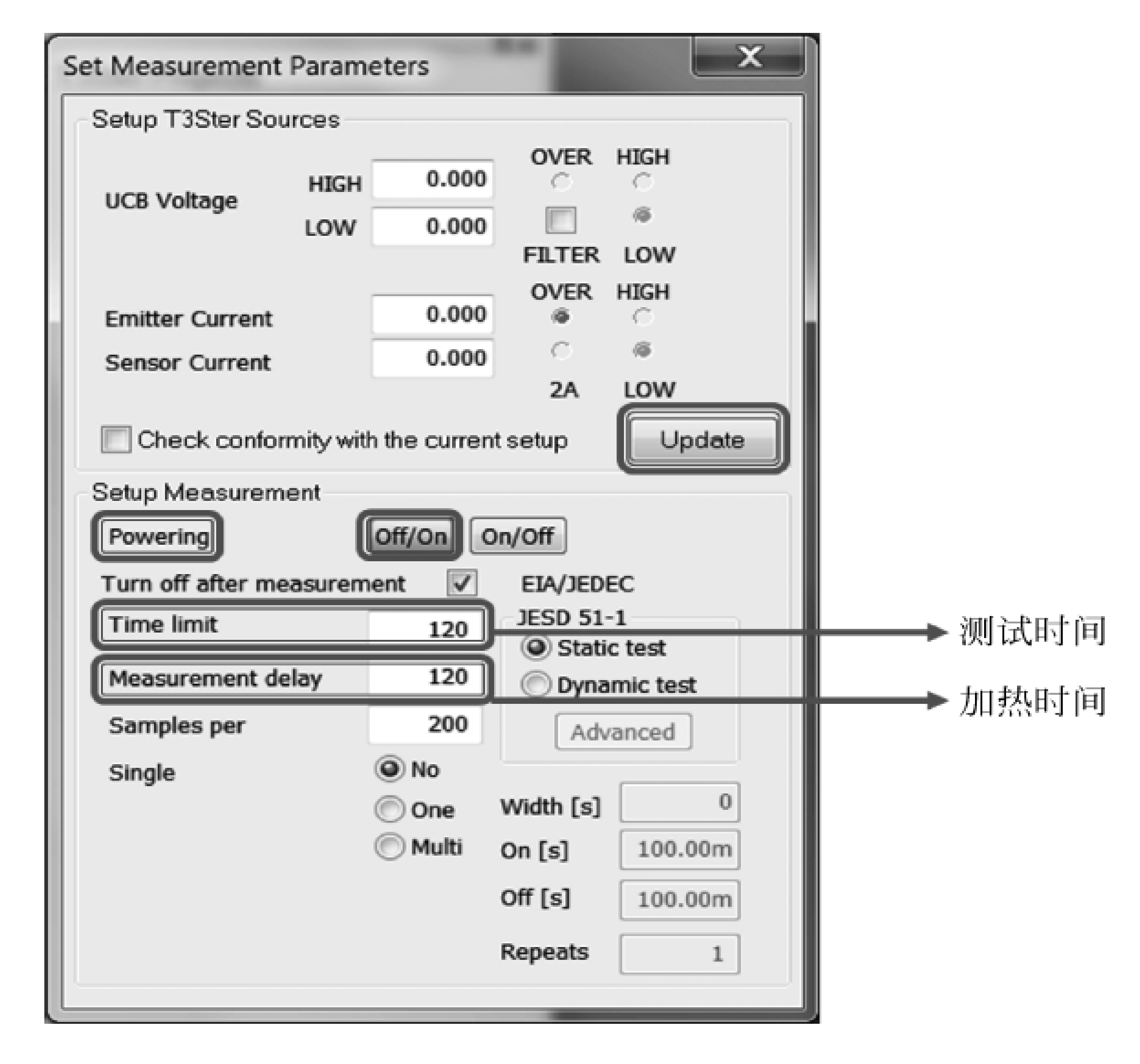


图 7-28 **Set Measurement Parameters 对话框的设置**

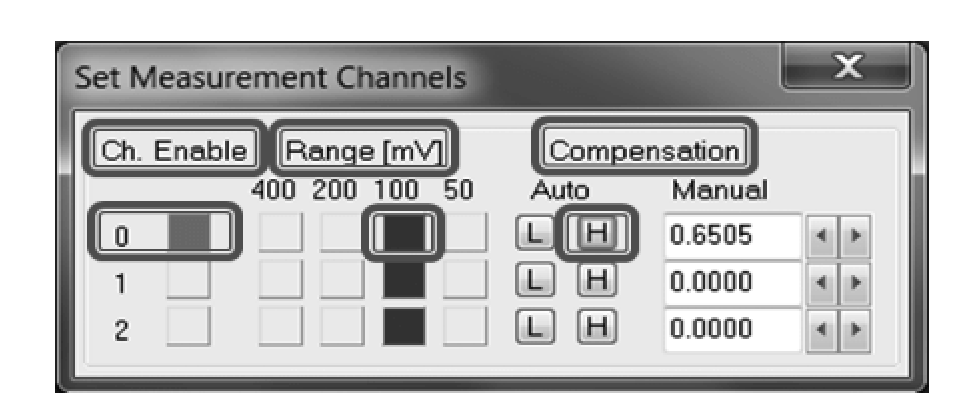


图 7-29 **Set Measurement Channels 对话框的设置**

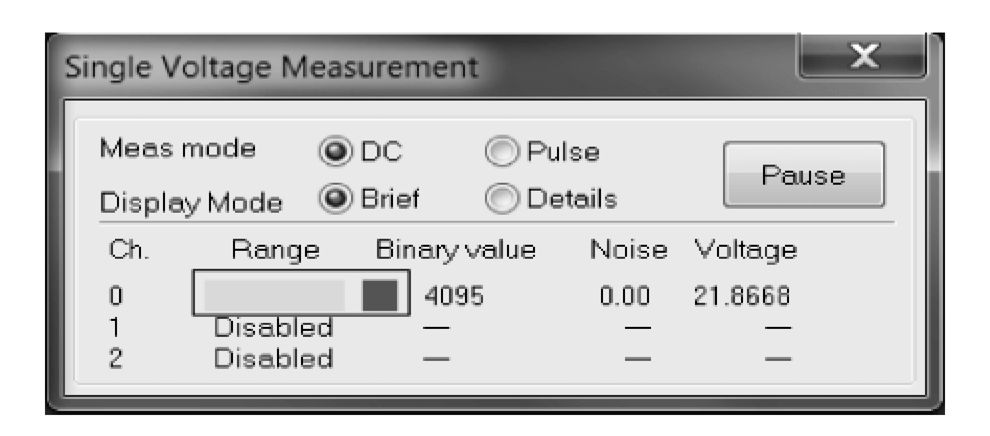


图 7-30 **Single Voltage Measurement 对话框显示红色，表示有量程溢出**

在 Set Measurement Channels 对话框的 Compensation 栏中，单击 H 按钮，进行补偿，表示量程的颜色栏变成黄蓝相间的条，说明当前的量程已经正常，此时黄色部分占 95%，蓝色部分占 5%，如图 7-31 所示。

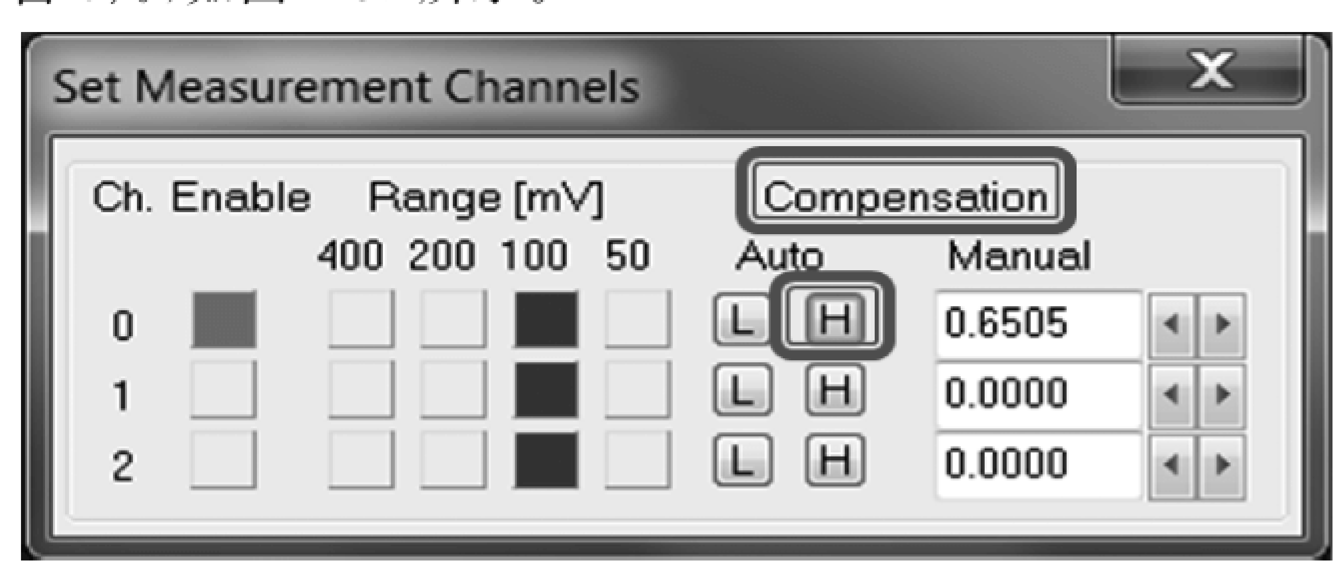


图 7-31 **Single Voltage Measurement 对话框显示黄、蓝色，表示量程正常**

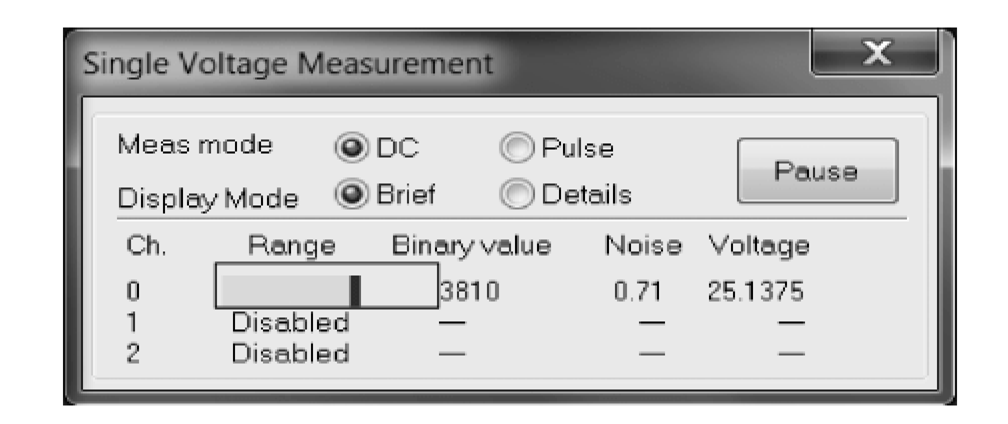


图 7-31 （续）

黄、蓝的分界线表示当前电压值(冷却状态下，被测 LED 器件施加测试电流时的电压值)，此例中，分界线代表的 25.1375V 这个电压值处于量程的 95%位置。

在 Channel Attributes 对话框的 Driving p. 栏中，选择 Channel 0，被选择的测试通道显示为天蓝色；在 Diode 栏中，选择 D，在 Divider 栏中自动显示当前 T3Ster Booster 使用的分压器的数值，在此例中为 34.243，如图 7-32 所示。

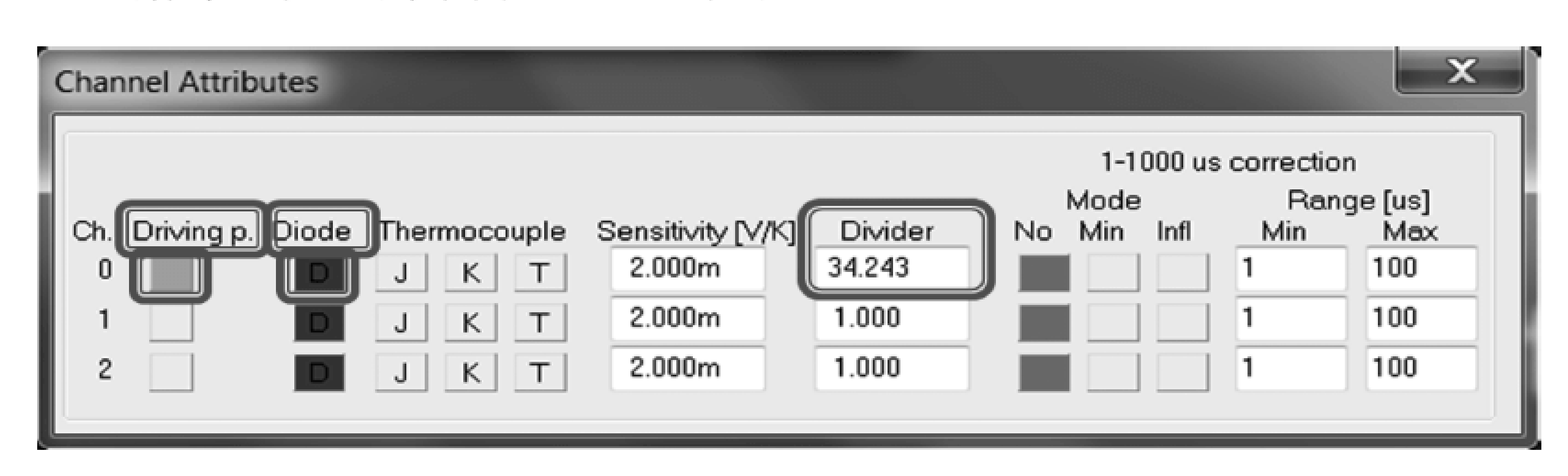


图 7-32 Channel Attributes 对话框的设置

设置完成的 T3Ster 系统控制软件的界面，如图 7-33 所示。

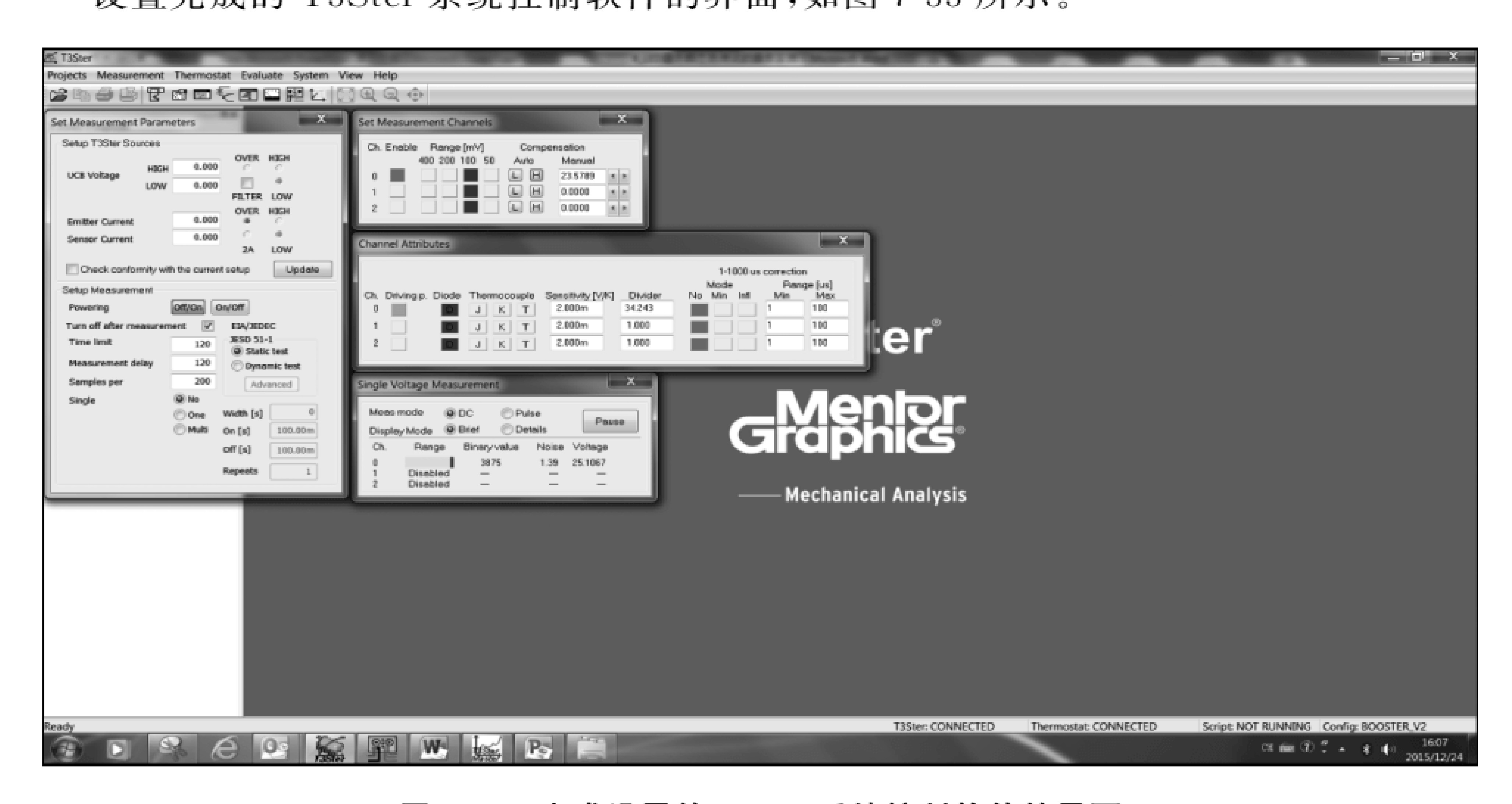


图 7-33 完成设置的 T3Ster 系统控制软件的界面

单击 Thermostat 菜单，选择 Setup Thermostat 菜单命令，如图 7-34 所示。

图 7-34 选择 Setup Thermostat 菜单命令

在出现的 Setup Thermostat 对话框中，选择外接的 Julabo 液冷循环器的型号、与控制主机相连的端口号以及相应的波特率等参数，单击 OK 按钮，如图 7-35 所示。



图 7-35 Setup Thermostat 对话框的设置

屏幕上出现连接成功的提示，然后单击 OK 按钮，如图 7-36 所示。

再次单击 Thermostat 菜单，选择 Auto thcoeff Measurement 菜单命令，出现 Thermal Coefficient Measurement 对话框，如图 7-37 所示。

在对话框进行参数设置完成后，单击 Start 按钮，进行被测 LED 器件温度敏感参数的测量和校准，如图 7-38 所示。

正在进行被测 LED 器件温度敏感参数测量和校准的 Thermal Coefficient Measurement 对话框，如图 7-39 所示。

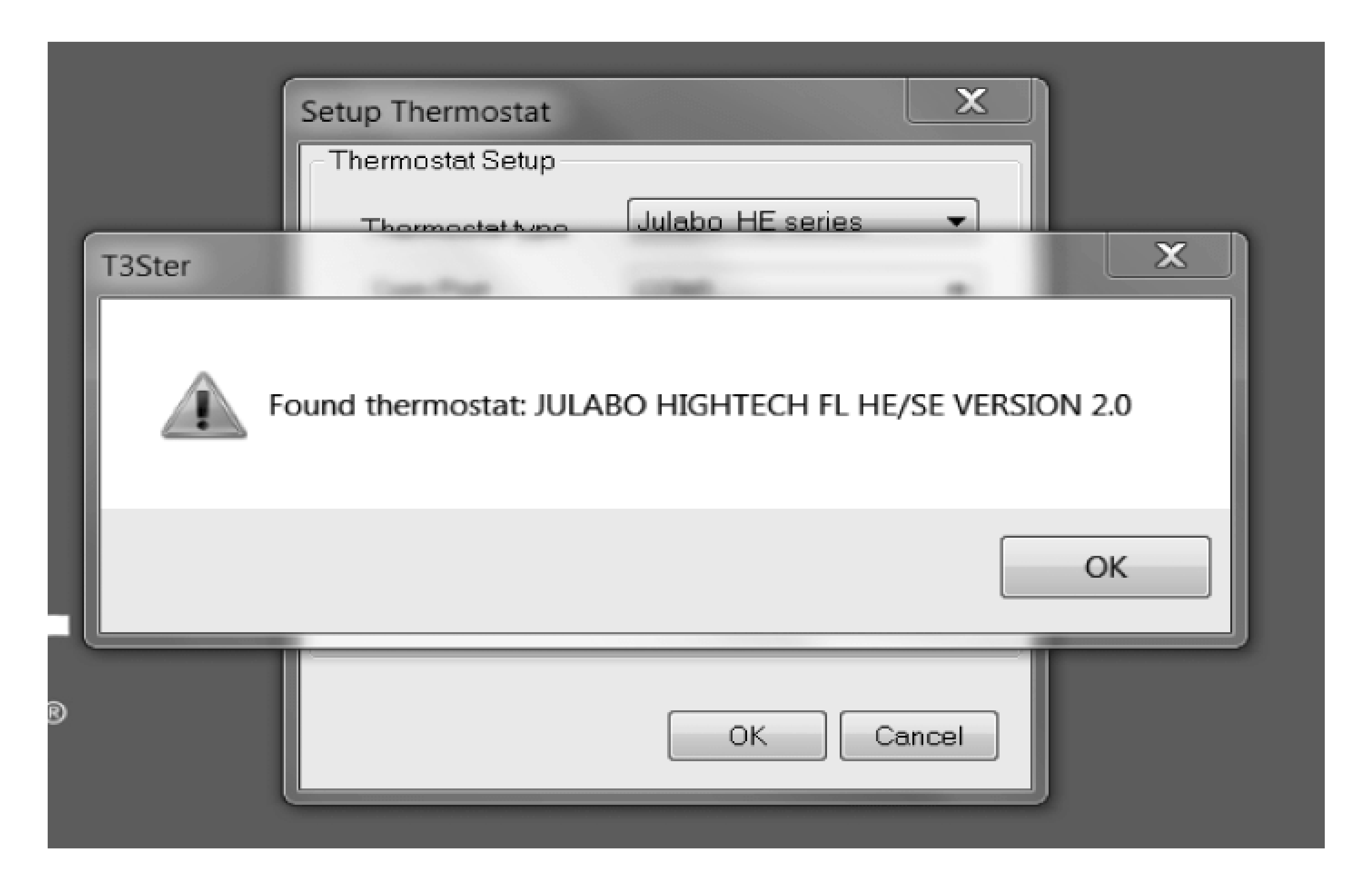


图 7-36　连接 Julabo 液冷循环器成功后屏幕的提示

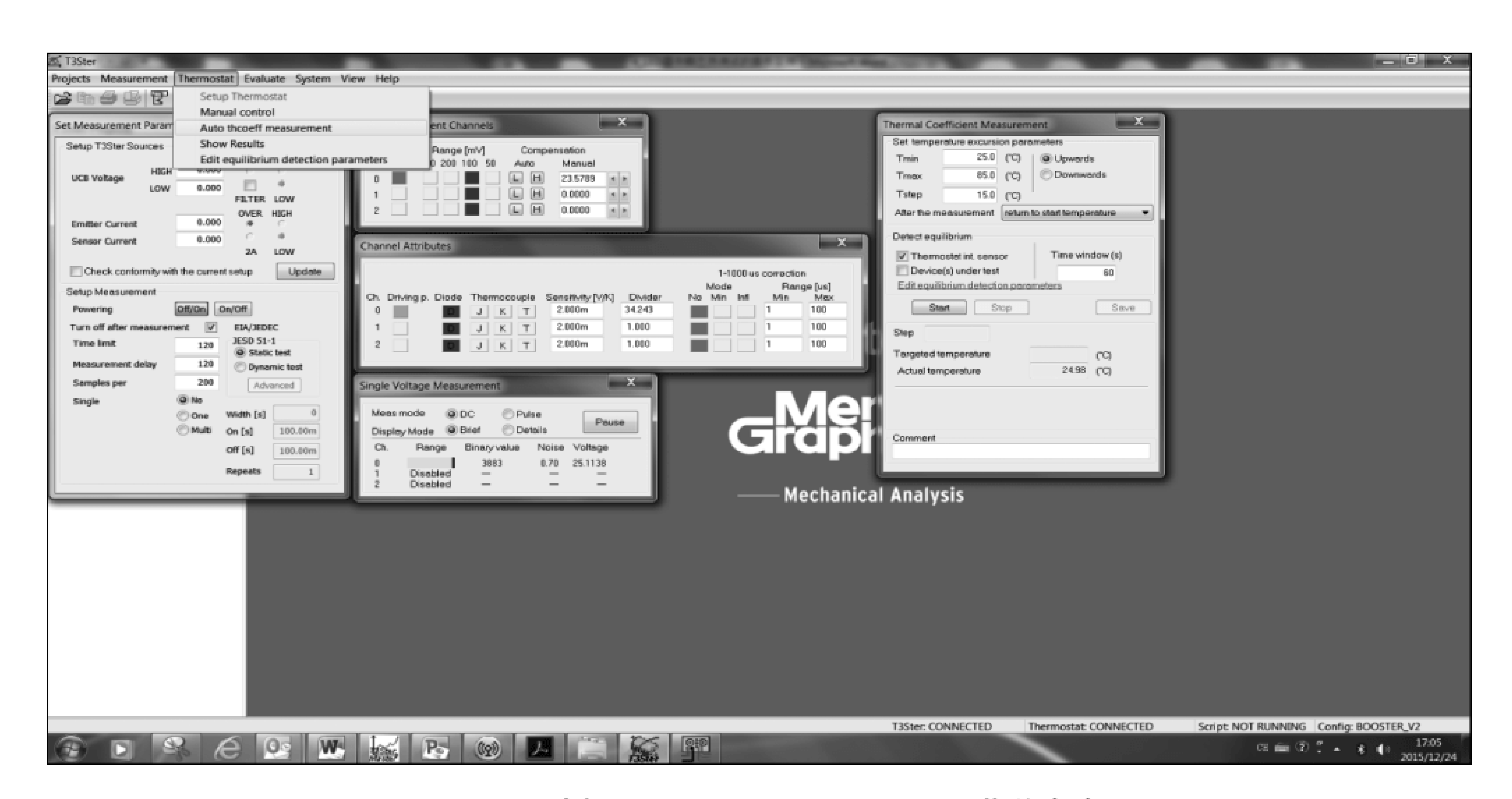


图 7-37　选择 Auto thcoeff Measurement 菜单命令

被测 LED 器件温度敏感参数测量和校准完成后，单击 Save 按钮，保存测量和校准的结果。在出现的 Save As 对话框中输入文件名进行保存，文件名的格式可以按照“样品名_测试电流_K factor”的方式，被测 LED 器件测量和校准后的结果以. TCO 格式的文件被保存到控制计算机中，如图 7-40 所示。

被测 LED 器件温度敏感参数测量和校准的结果如图 7-41 所示，此例中，被测 LED 器件的温度敏感参数为−12.915mV/K。

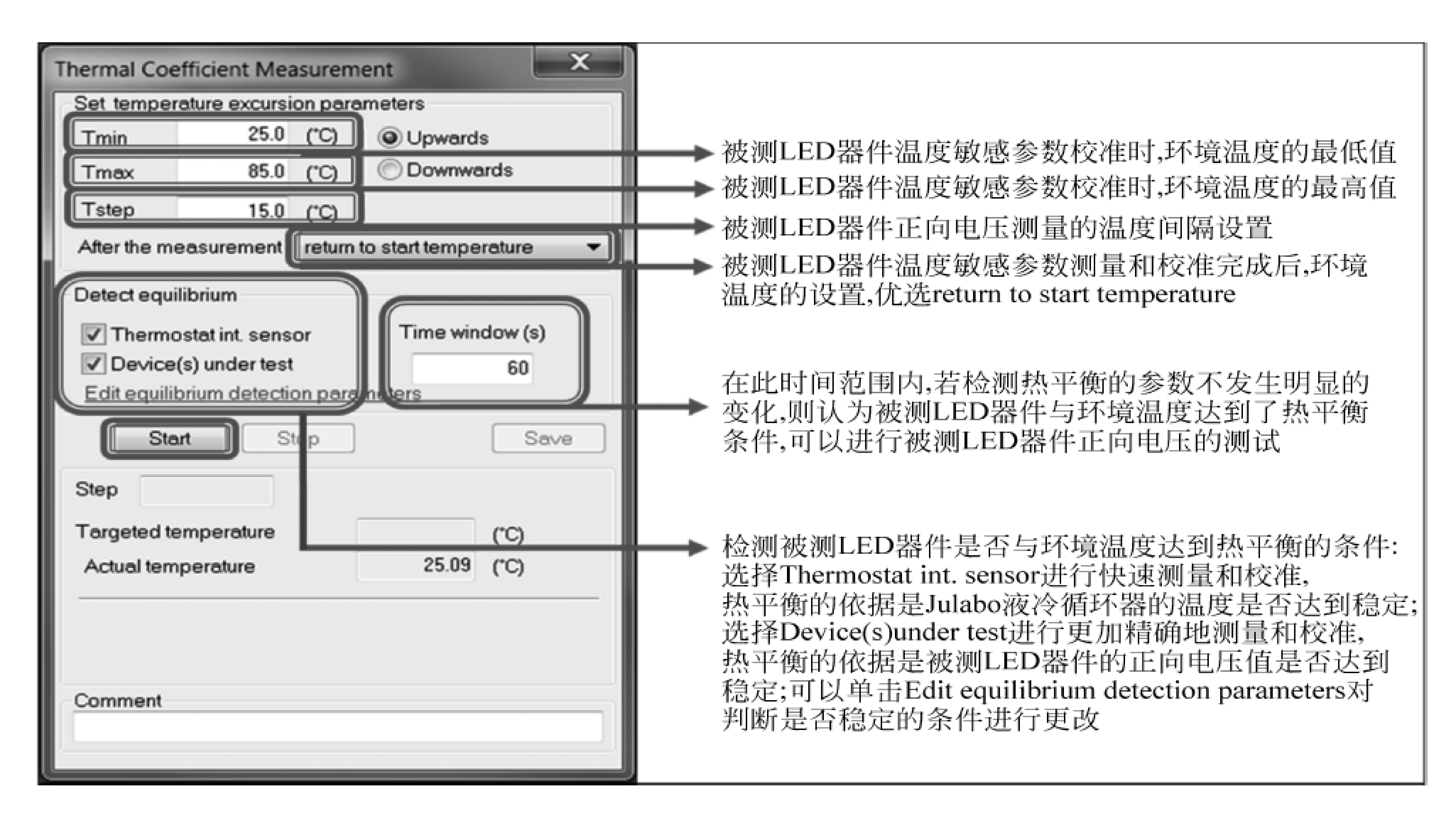


图 7-38 Thermal Coefficient Measurement 对话框参数的设置

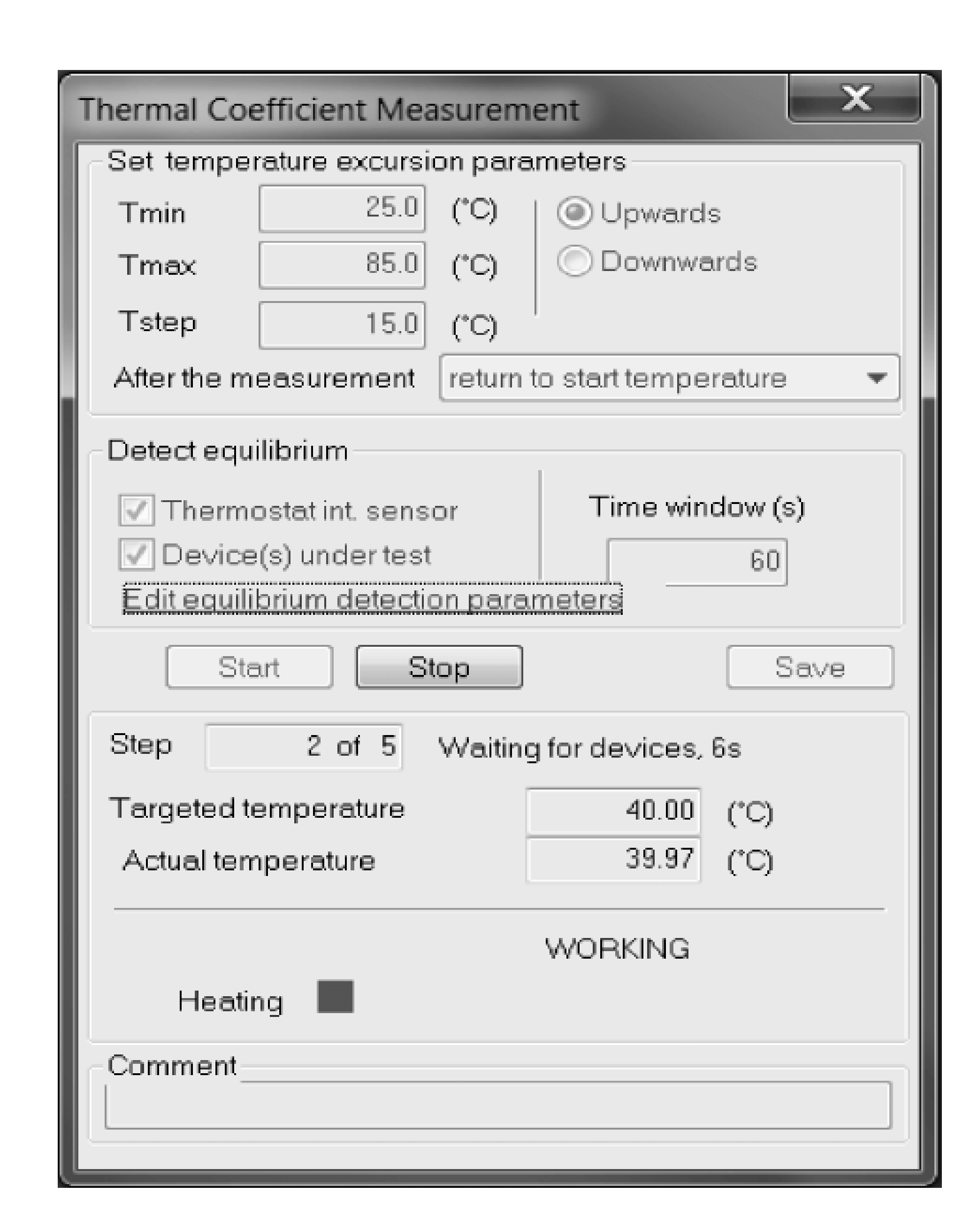
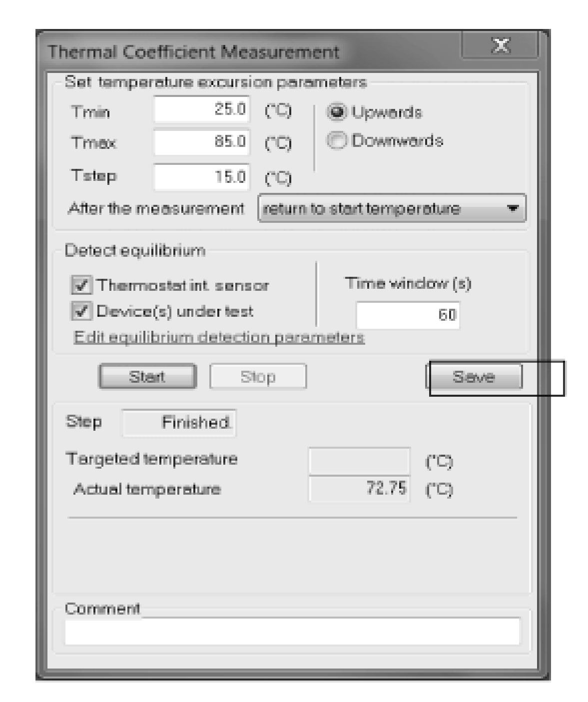


图 7-39 正在进行测量和校准的 Thermal Coefficient Measurement 对话框



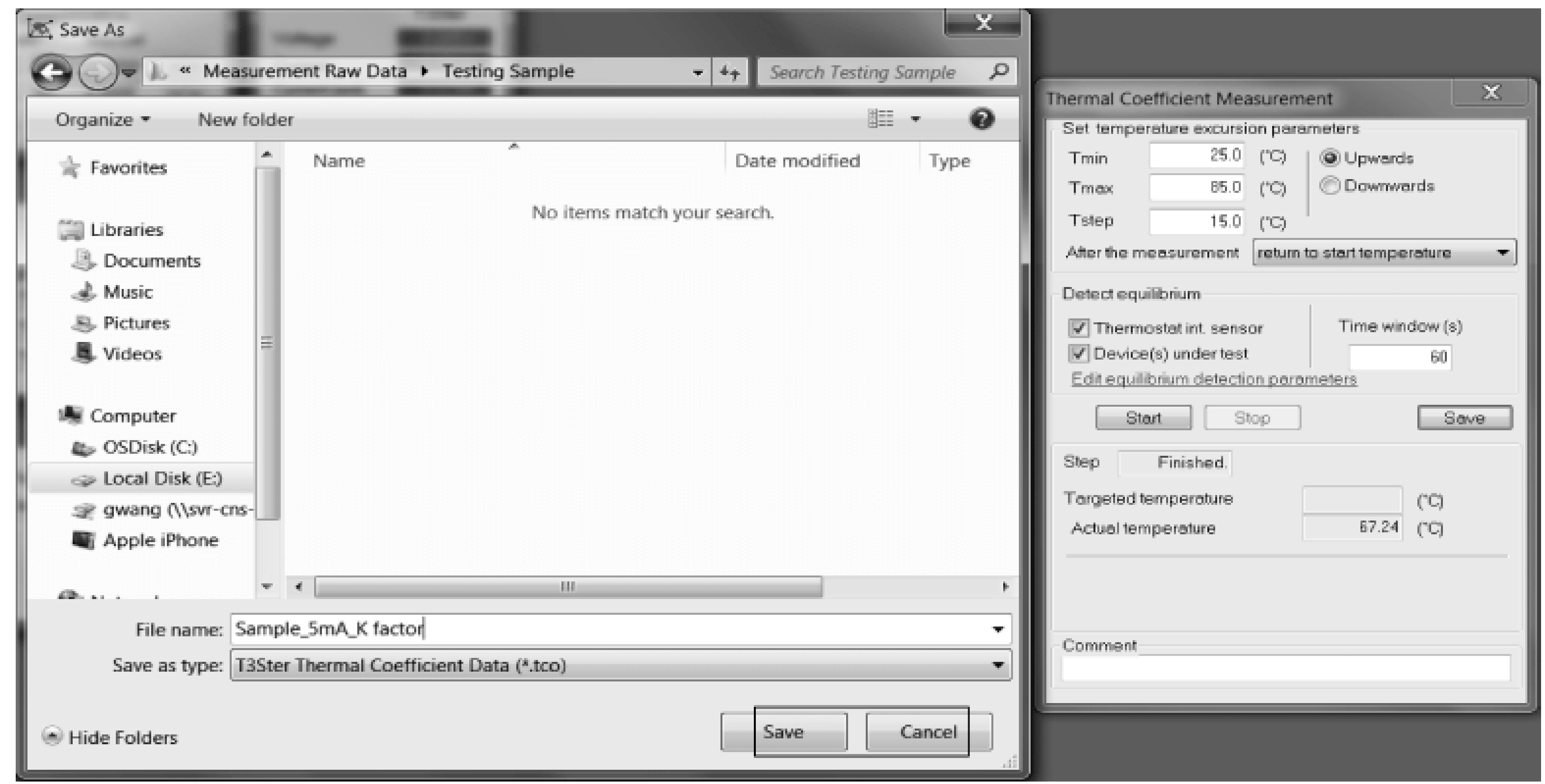


图 7-40　被测 LED 器件温度敏感参数测量和校准结果的保存

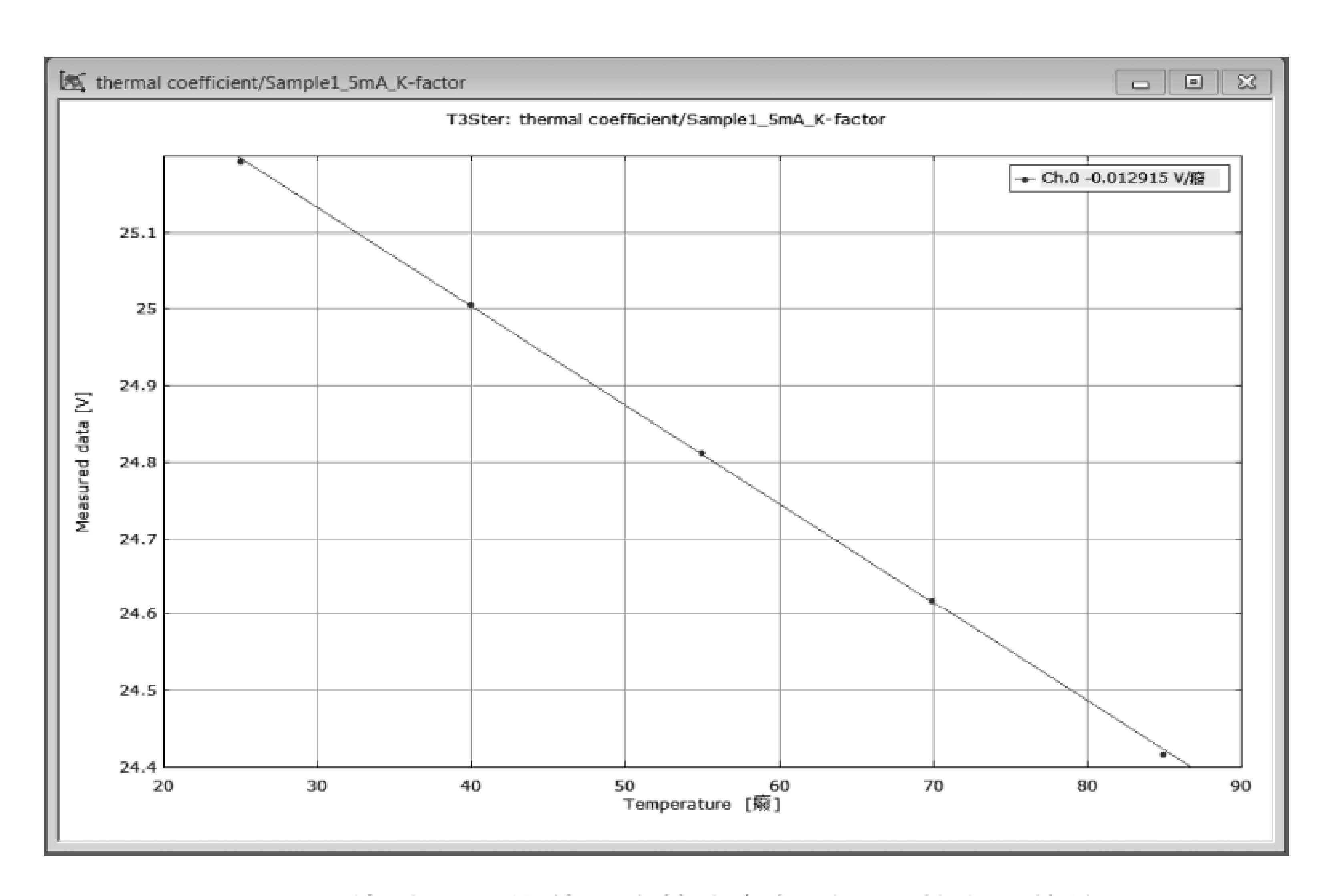


图 7-41　被测 LED 器件温度敏感参数测量和校准后的结果

7.2.2 LED 器件的瞬态热测试

被测 LED 器件的温度敏感参数测量和校准完成后，可以进行瞬态热测试。单击 Thermostat 菜单，选择 Manual control 菜单命令，出现 Thermostat manual control 对话框，如图 7-42 所示。

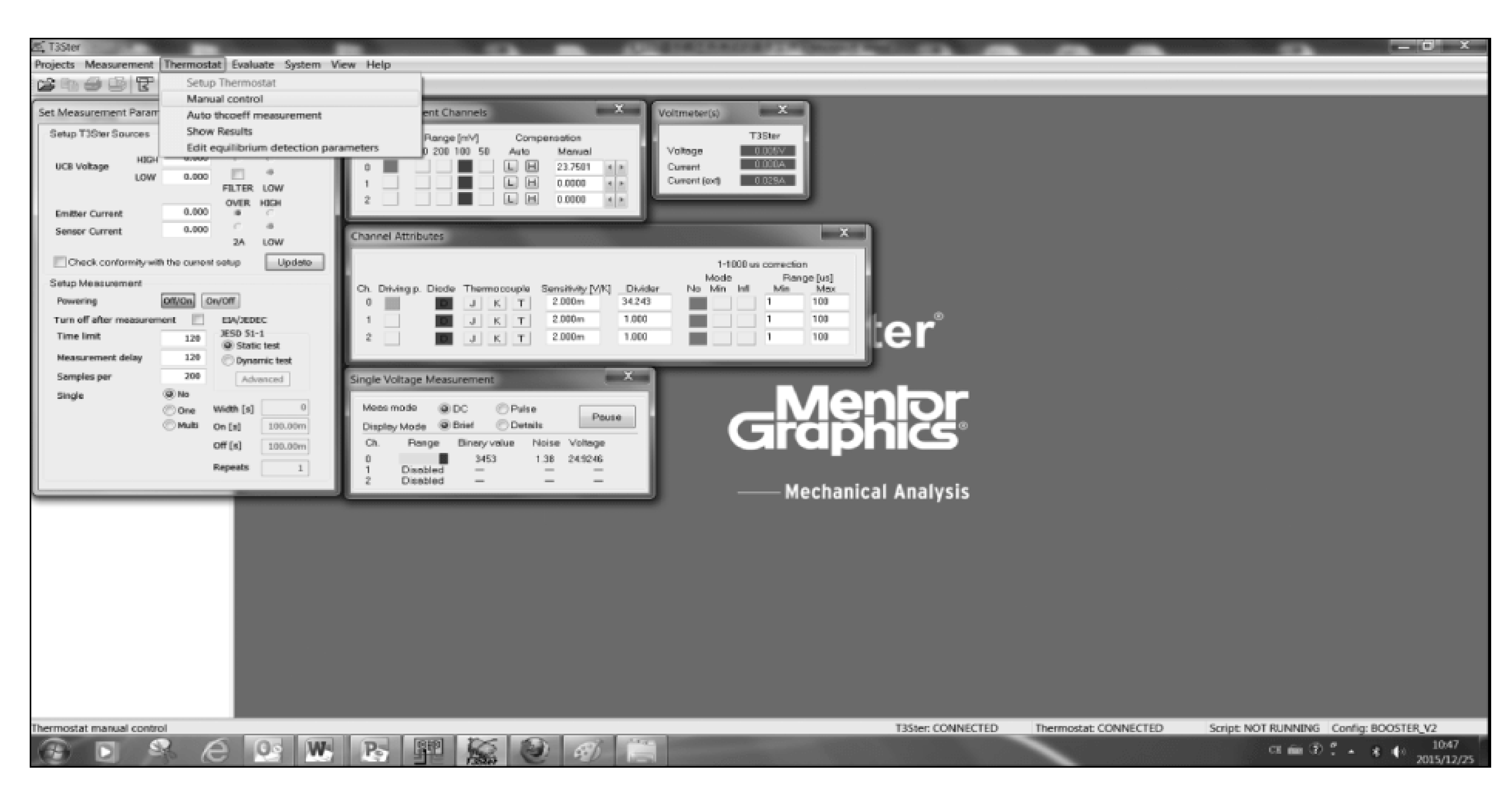


图 7-42　选择 Manual control 菜单命令

在 Thermostat manual control 对话框中进行参数设置，完成后单击 Set 按钮，如图 7-43 所示。

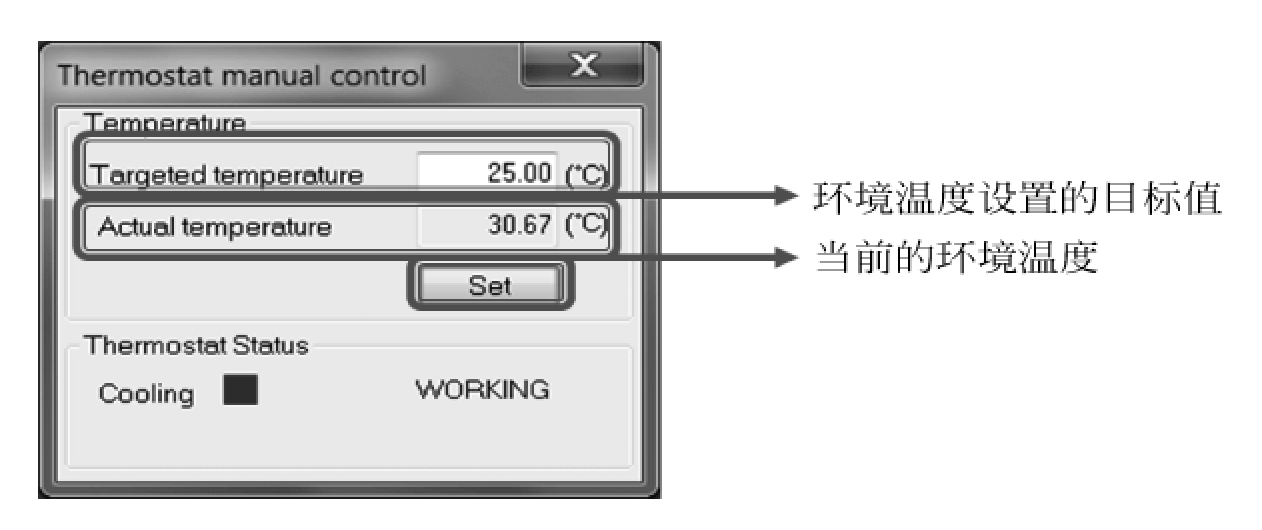


图 7-43　环境温度的设置

当环境温度稳定后，单击 Set Measurement Parameters 对话框 Powering 栏的 off/on 按钮，然后单击 Update 按钮；在 Set Measurement Channels 对话框中单击 H 按钮，然后确认在 Single Voltage Measurement 对话框中出现代表当前的量程已经正常的黄、蓝色条，如图 7-44 所示。

单击 Start Measurement 菜单，出现 Measurement 对话框，如图 7-45 所示。

在出现的 Measurement 对话框中，检查 Configuration 栏是否显示正确的设置，确认

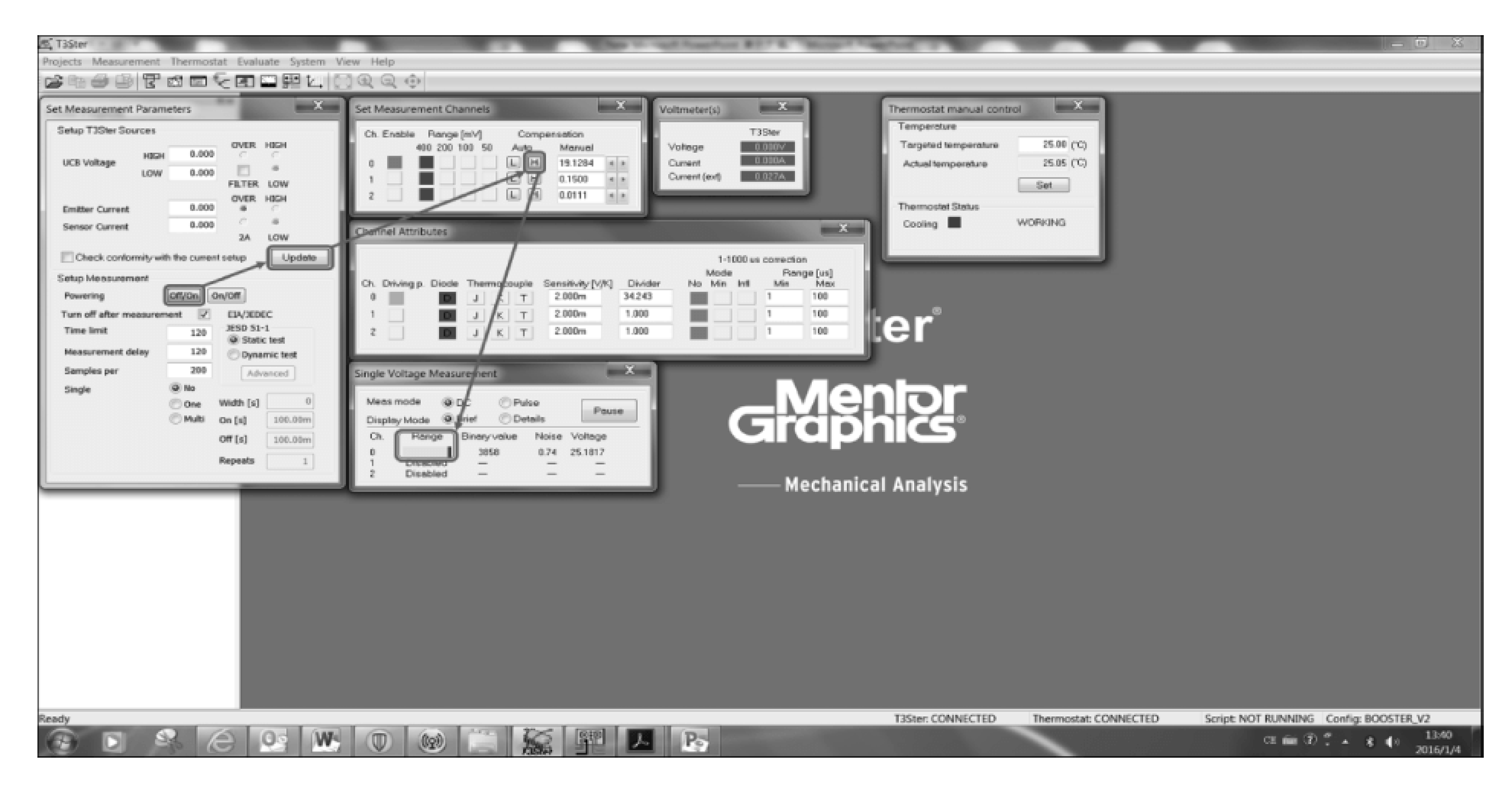


图 7-44　瞬态测试前确认出现正常的量程显示

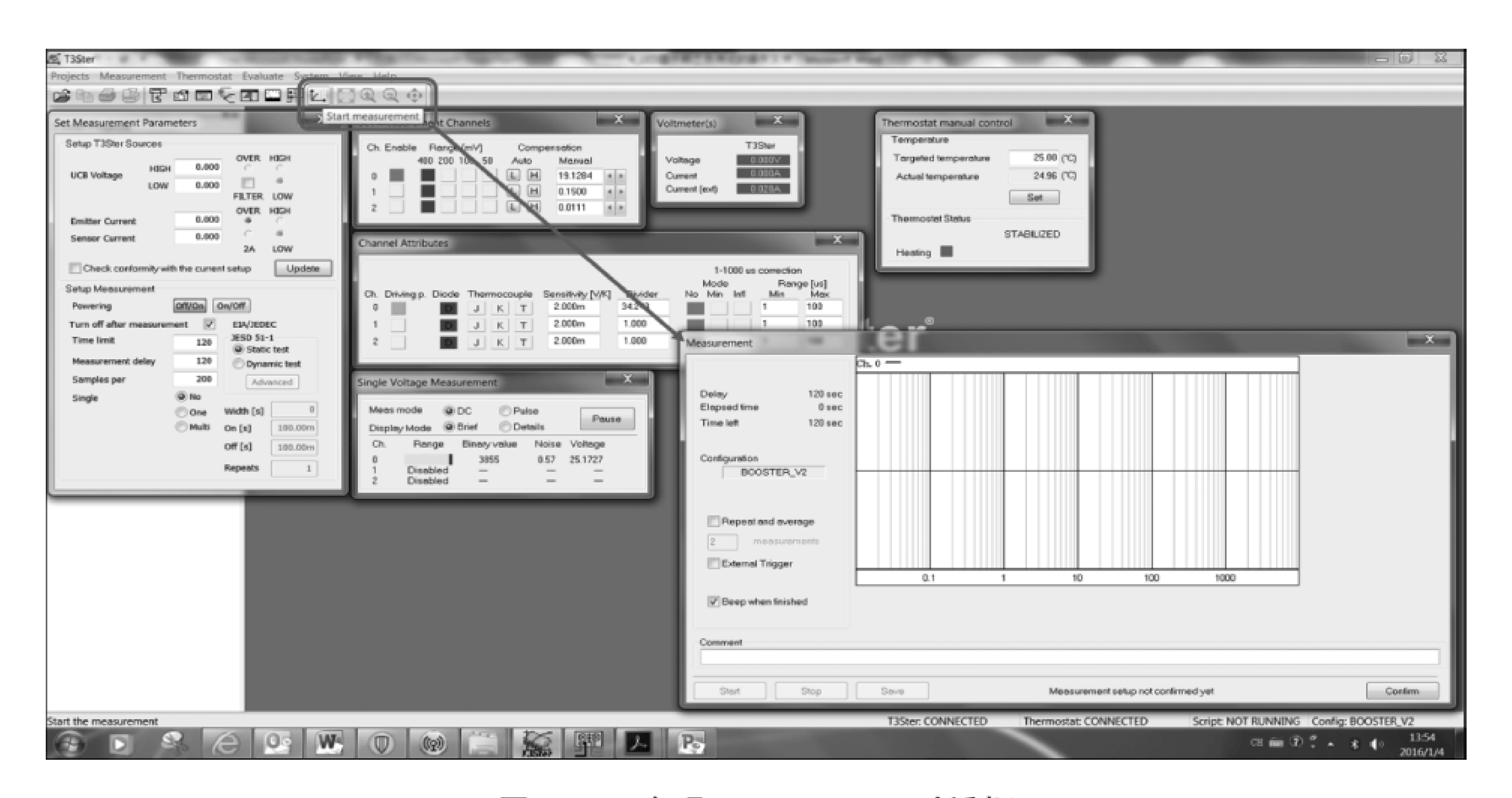


图 7-45　出现 Measurement 对话框

后，单击 Confirm 按钮，如图 7-46 所示。

在 Set Measurement Parameters 对话框 Powering 栏单击 on/off 按钮，此时加热电流流过被测 LED 器件，单击 Measurement 对话框中 Start 按钮，开始瞬态热测试，如图 7-47 所示。

瞬态热测试完成后，单击 Measurement 对话框中的 Save 按钮，在出现的 Save Measurement 对话框中输入文件名进行保存，文件名的格式可以按照“样品名_测试电流_加热电流_加热时间测量时间_正向电压测量范围_测试条件_环境温度”的方式，被测 LED 器件瞬态热测试的文件被保存到控制计算机中，如图 7-48 所示。

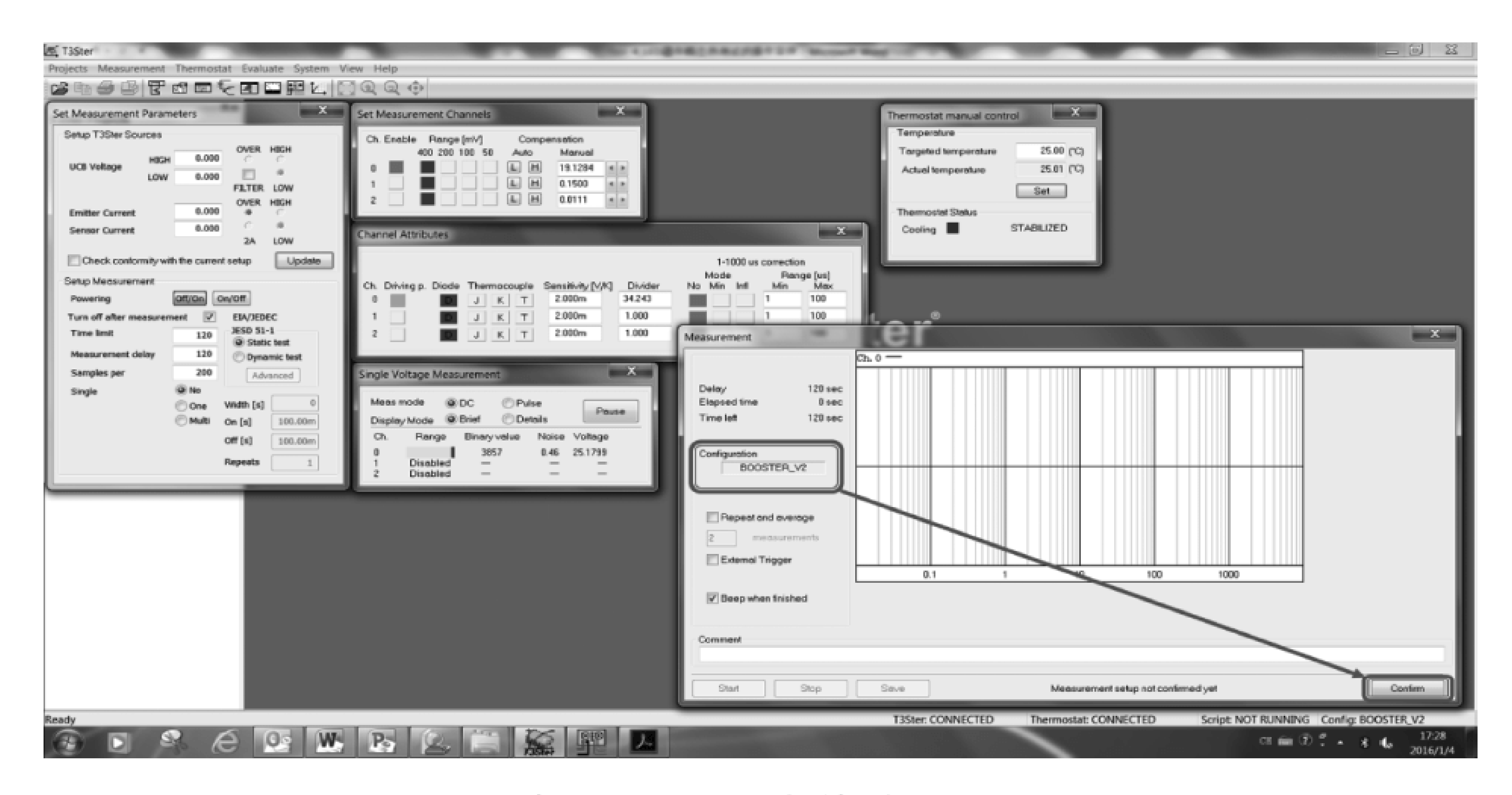


图 7-46　在 Measurement 对话框确认 Configuration

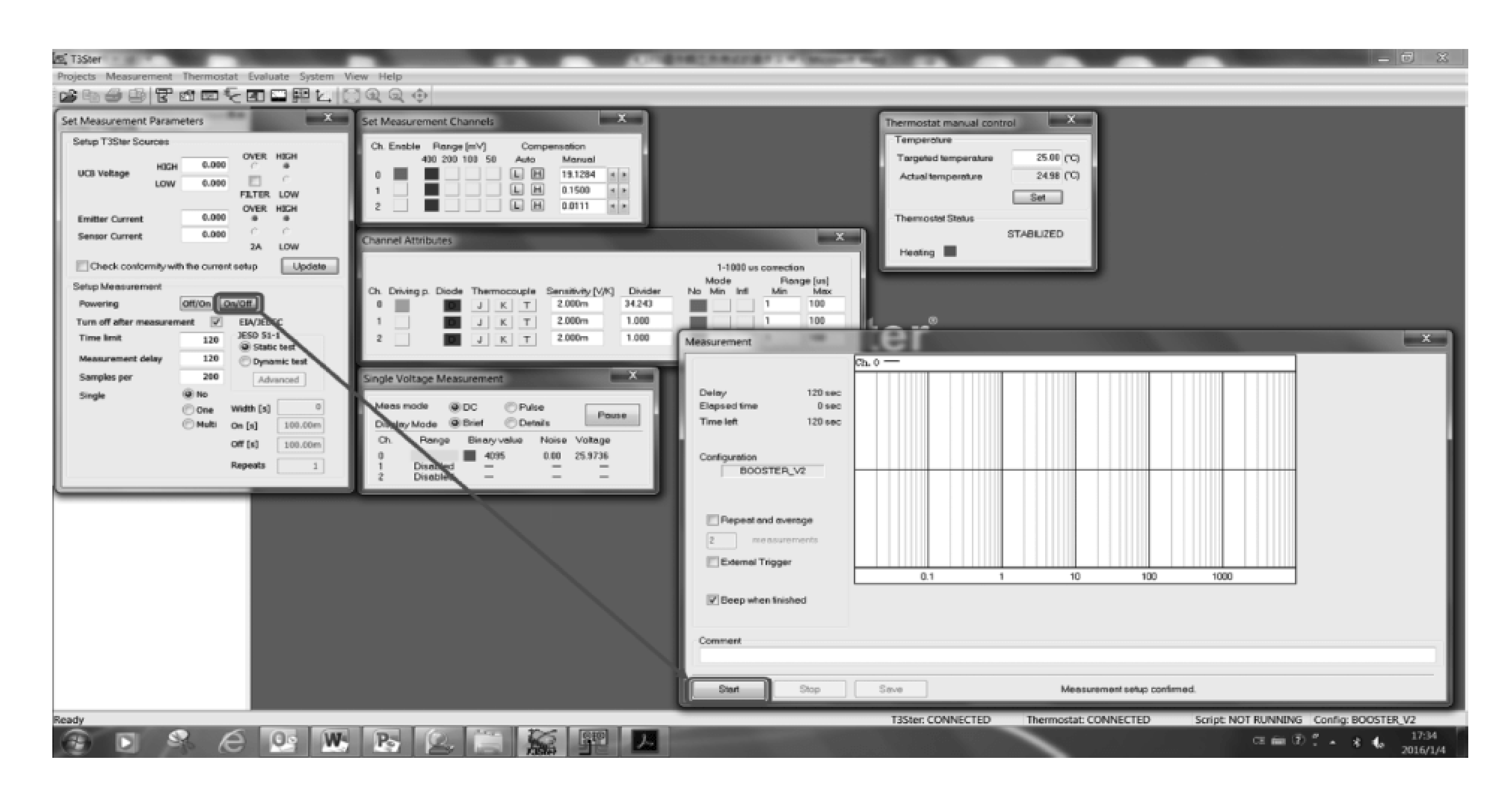


图 7-47　开始对被测 LED 器件进行瞬态热测试

7.2.3　瞬态热测试结果的分析

单击 T3Ster-Master 评估分析软件的快捷方式，打开 T3Ster-Master 评估分析软件，如图 7-49 所示。

选择 File→Open 菜单命令，打开瞬态热测试的原始文件，如图 7-50 所示。

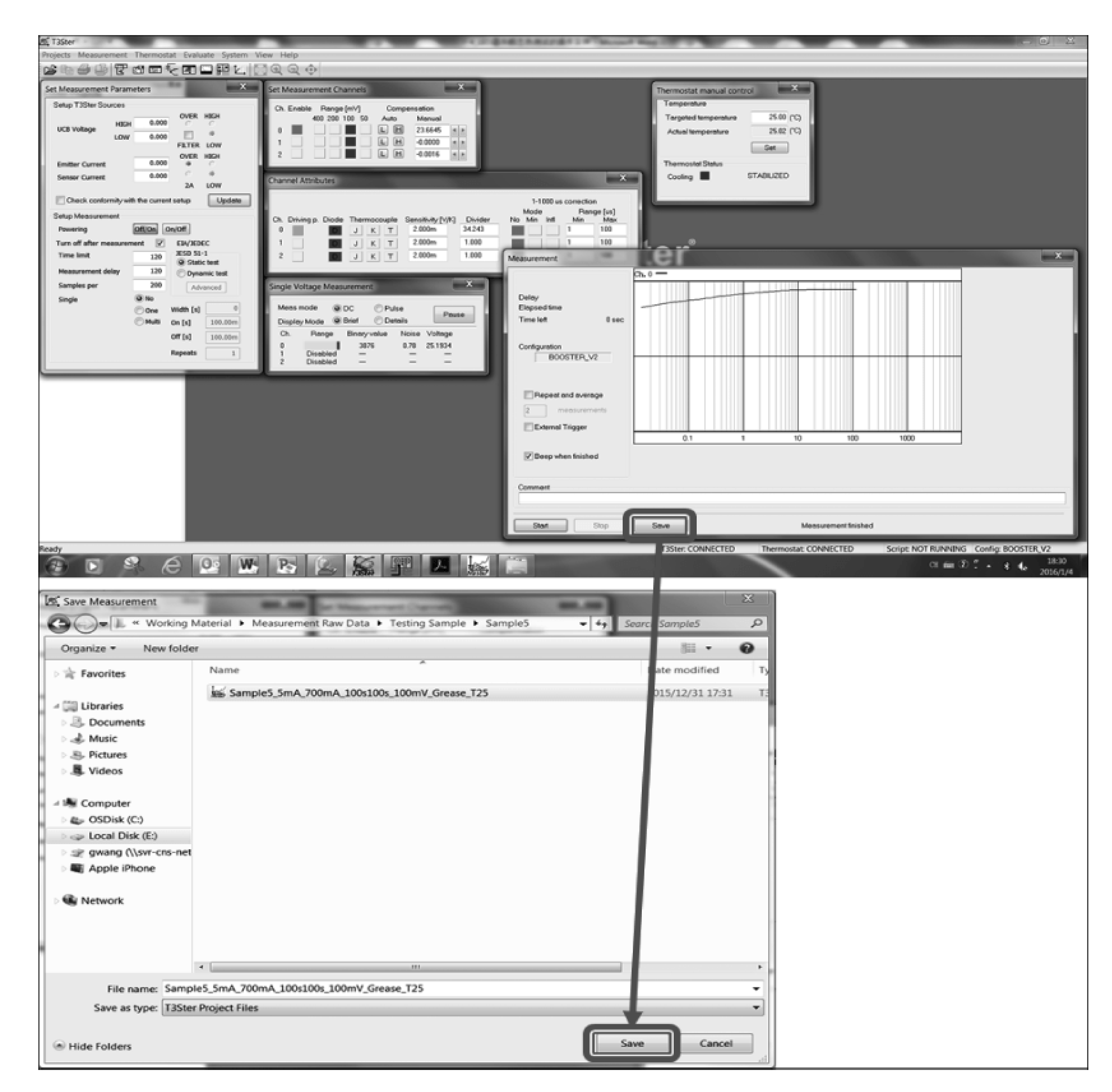


图 7-48　保存被测 LED 器件瞬态热测试的结果



图 7-49　T3Ster-Master 评估分析软件的启动界面

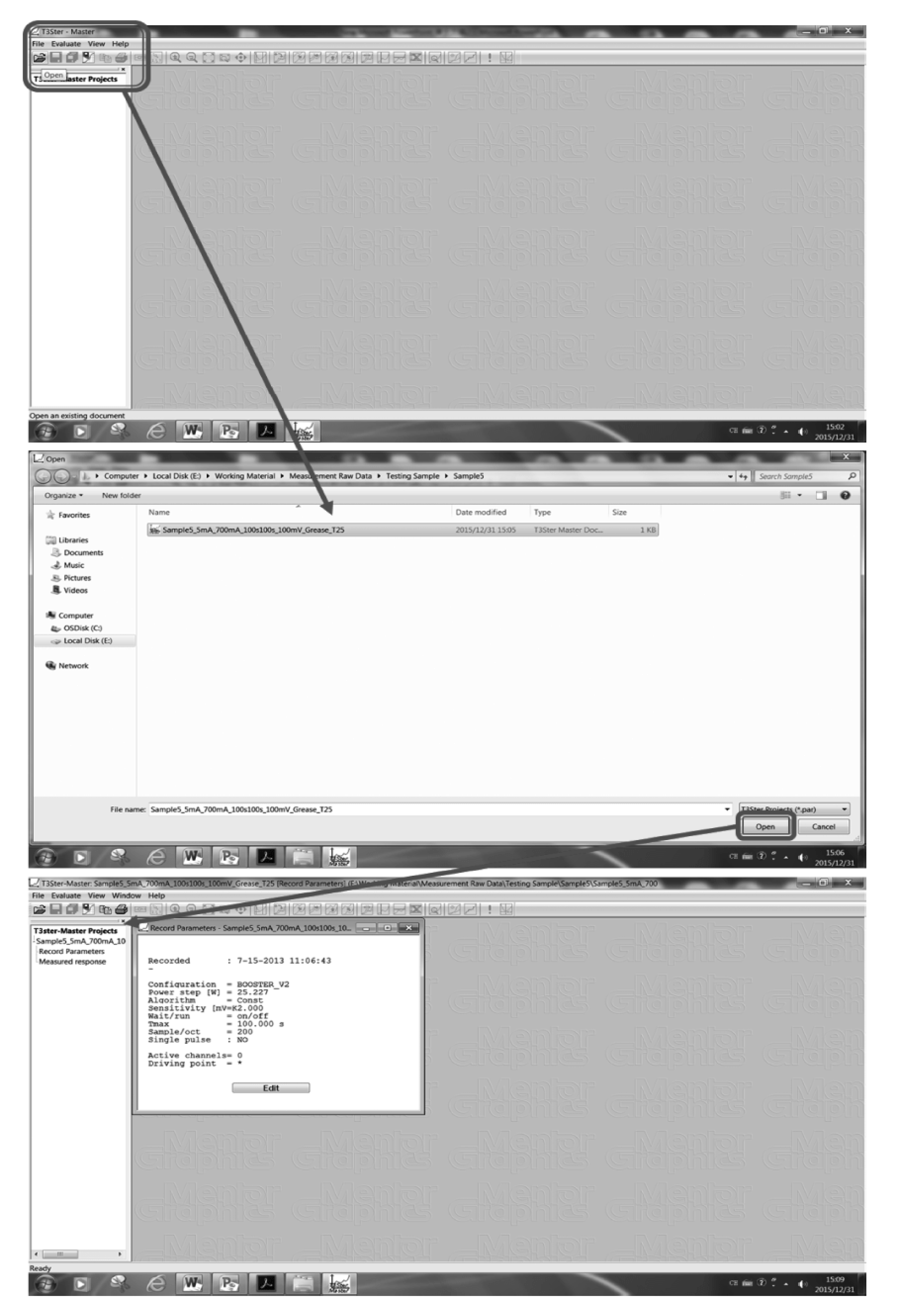


图 7-50 在 T3Ster-Master 评估分析软件中打开瞬态热测试原始文件

在 T3Ster-Master 评估分析软件中，出现两组结果，分别是 Record Parameters 和 Measured response。

打开 Record Parameters 对话框，包含的信息如图 7-51 所示。

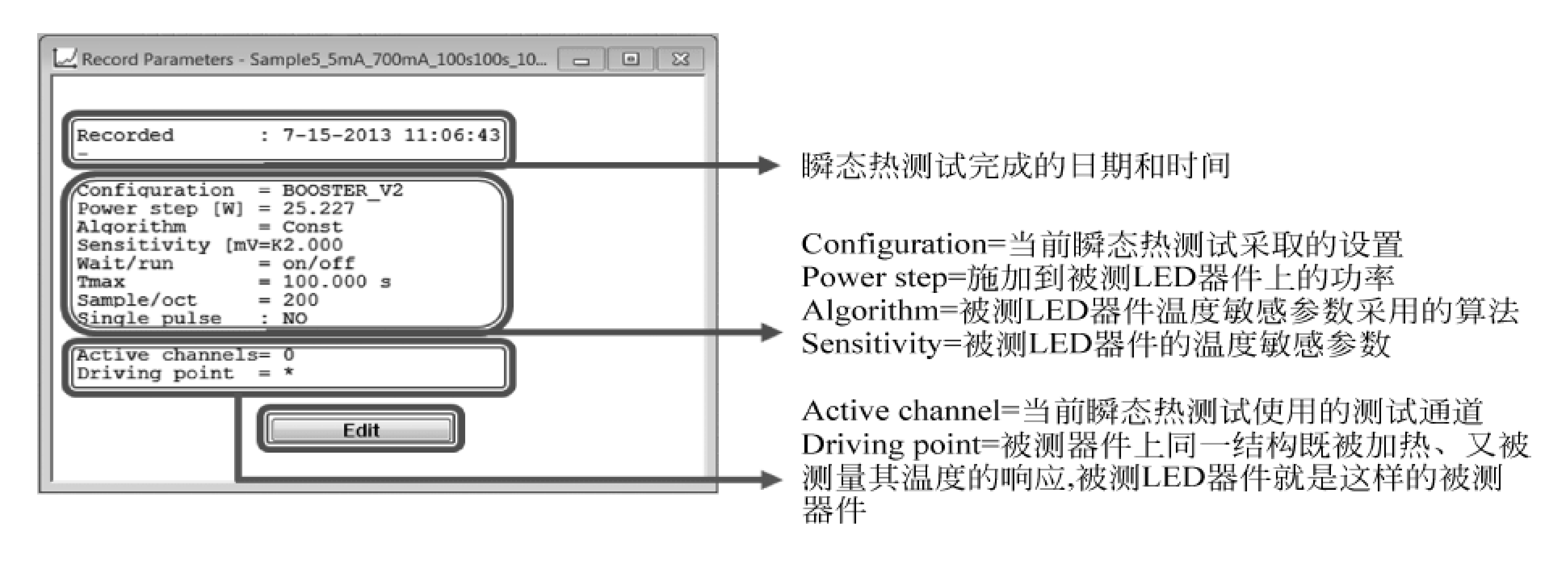


图 7-51　Record Parameters 对话框包含的信息

单击 Record Parameters 对话框中的 Edit 按钮，在 Algorithm 下拉列表选择 File 选项，在打开的对话框中选择之前保存的被测 LED 器件温度敏感参数的原始文件，并单击 Open 按钮，如图 7-52 所示。

在屏幕上出现的提示框中单击 OK 按钮，出现 Select Tco for Counting Polynomial 对话框，如果 Approximate function R^2 的数值大于 0.999，则选择 Approximate function type 下拉列表中的 Linear 选项，然后单击 OK 按钮，如图 7-53 所示。

此时在 Record Parameters 的对话框中可知，Sensitivity 栏显示被测 LED 器件经过测量和校准的温度敏感参数，数值为 −12.913mV/K。单击 Save 按钮进行保存，如图 7-54 所示。

单击 Measured response 项目，出现被测 LED 器件瞬态热测试后结温度随时间的变化曲线，曲线中纵轴为温度轴，横轴为对数时间轴，如图 7-55 所示。

T3Ster 系统采用瞬态热测试方法中的静态测试法进行测量，即：首先通过加热电流对被测 LED 器件加热，达到热平衡状态之后切换到测试电流，使用测试电流测量被测 LED 器件在结温度冷却阶段结温度随时间的变化曲线。

在加热电流和测试电流切换过程中，受到被测 LED 器件以及 T3Ster 系统本身的寄生电容的影响，在电流切换的瞬间，通过测试电流得到的电压会有较大的波动，存在着初始电气噪音。但是这些初始电气噪音显然与结温度无关，所以在根据被测 LED 器件温度敏感性进行电压换算结温度的时候，需要把这些初始电气噪音去除，可以按照 JEDEC 组 JESD51-14 的规定进行处理。

单击 Plot 菜单，选择 SQRTScale X 菜单命令，将 X 轴由对数时间轴，变成根号时间轴，如图 7-56 所示。

单击 Zoom In 图标，出现放大镜的图标后，用鼠标从右下向左上画方框，对最初的测试部分进行放大，如图 7-57 所示。

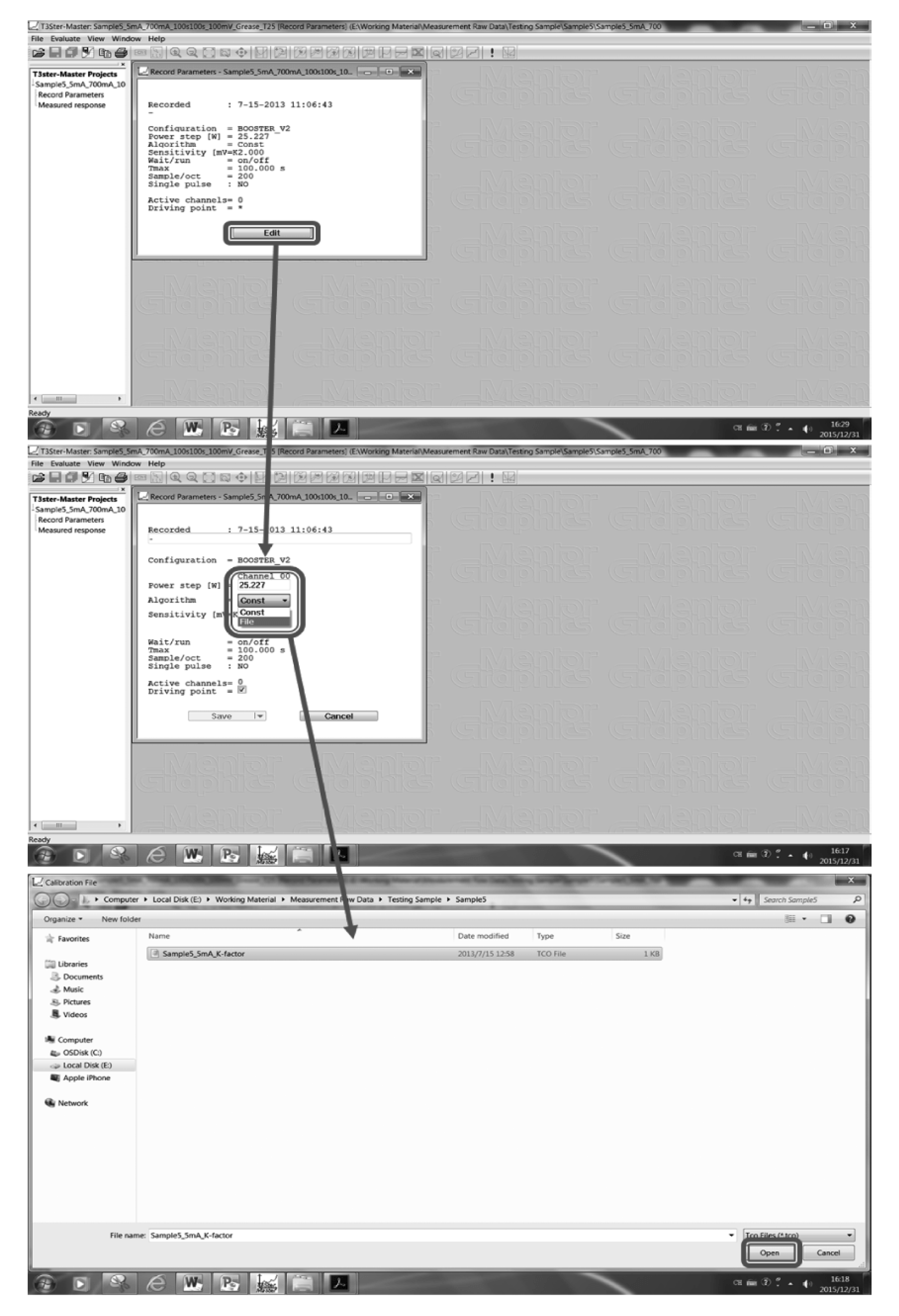


图 7-52　打开被测 LED 器件温度敏感参数的原始文件

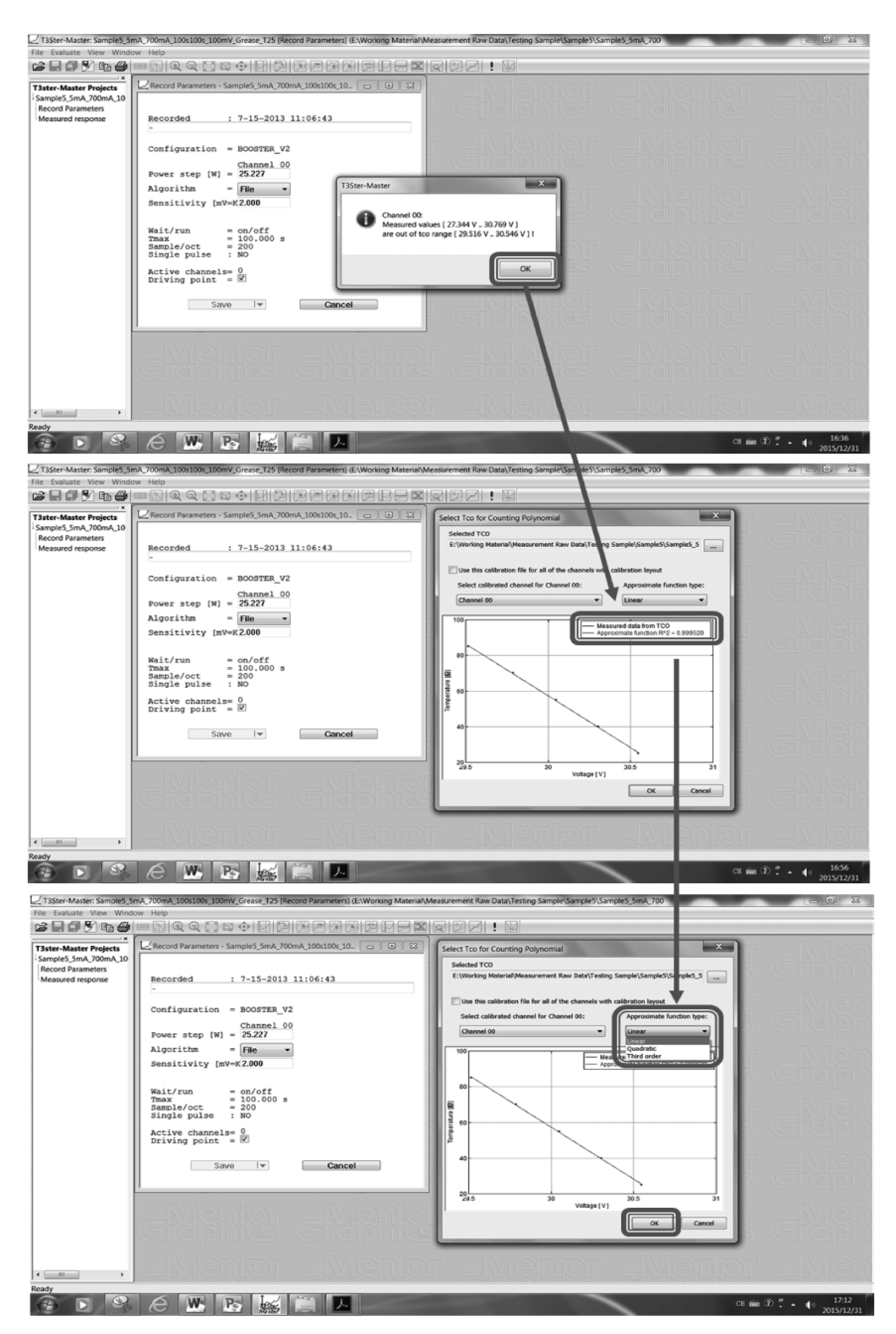


图 7-53　被测 LED 器件温度敏感参数算法的选择

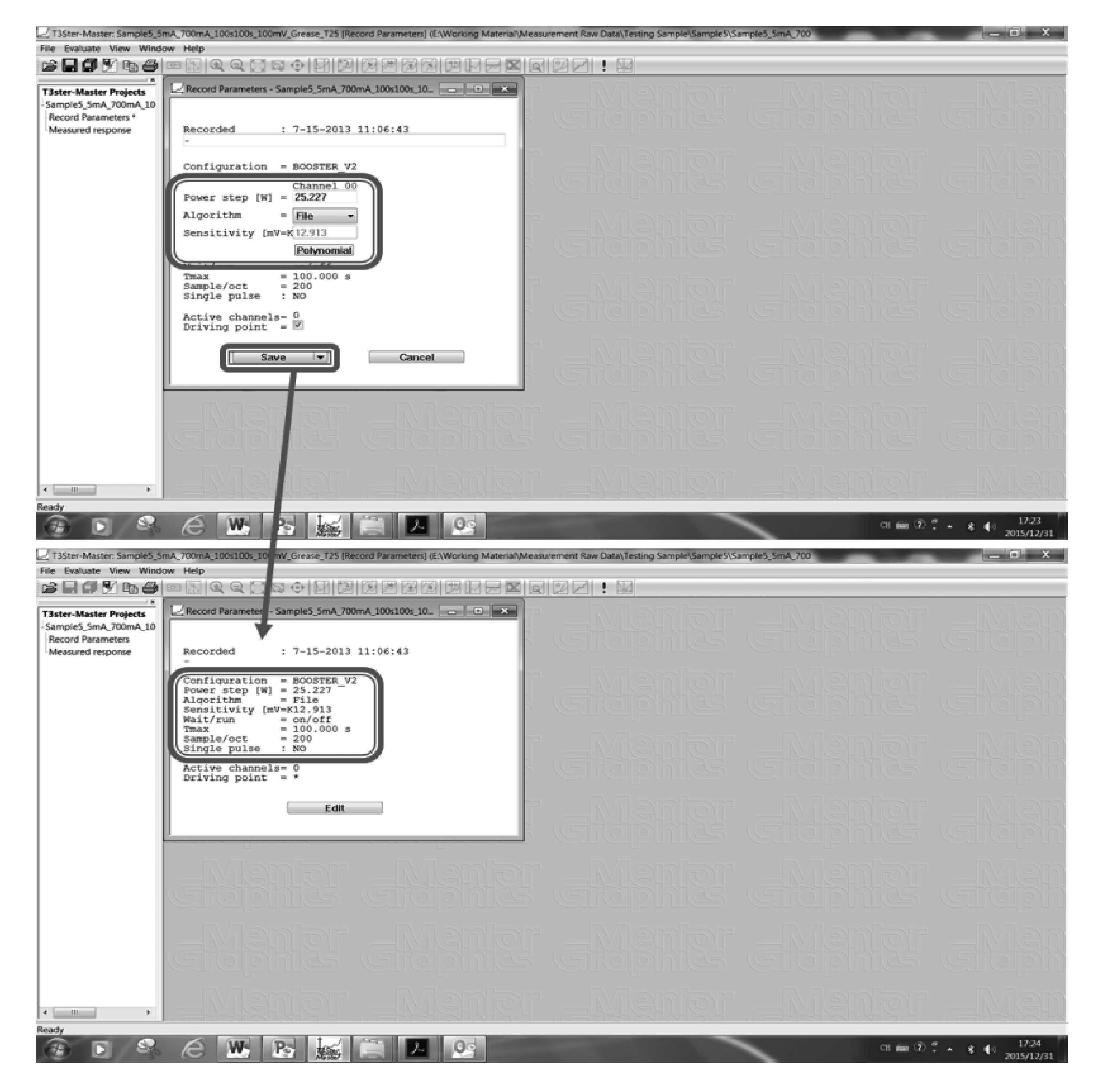


图 7-54 处理后的 Record Parameters 对话框

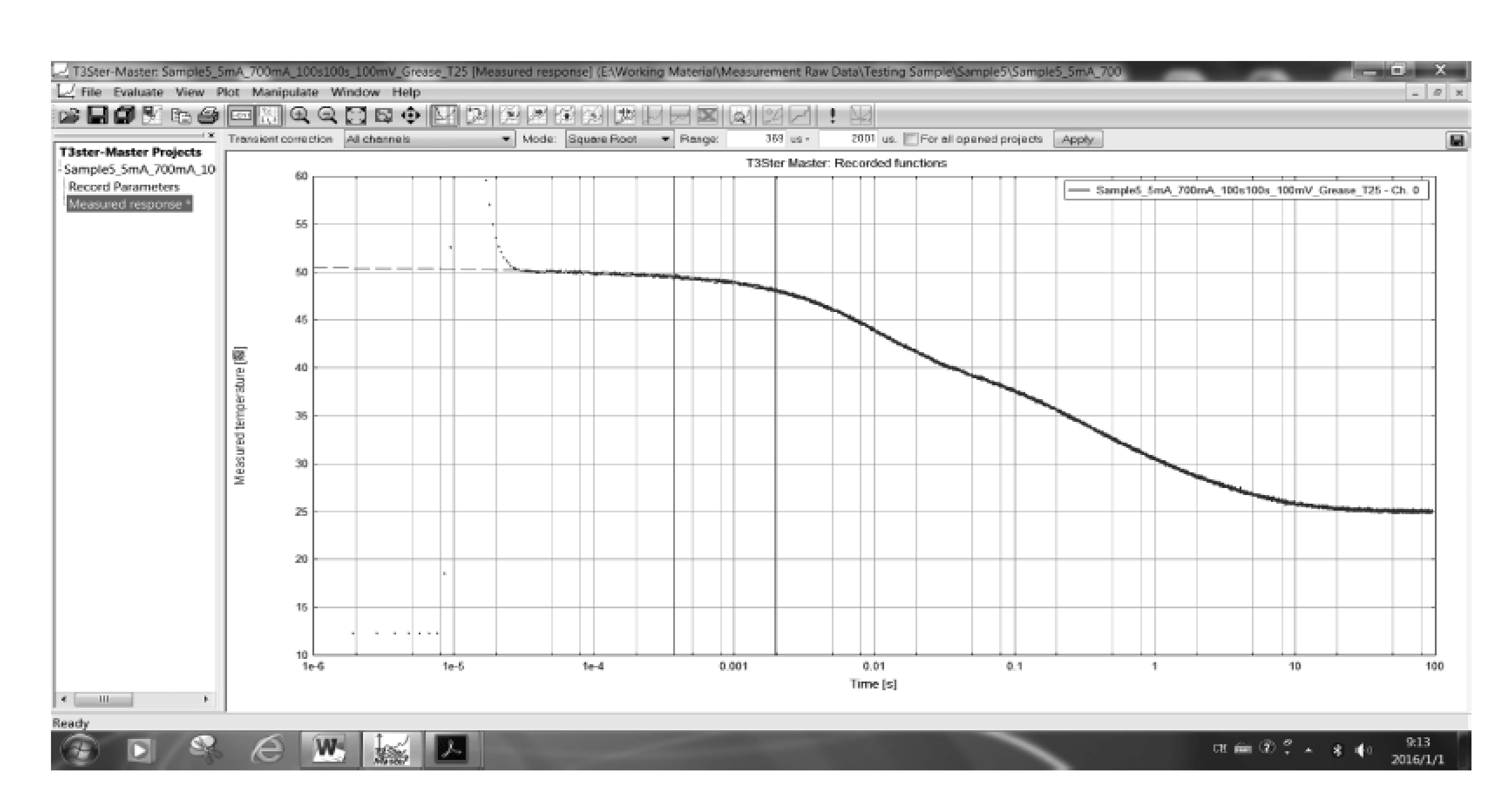


图 7-55 被测 LED 器件瞬态热测试后结温度随时间变化曲线

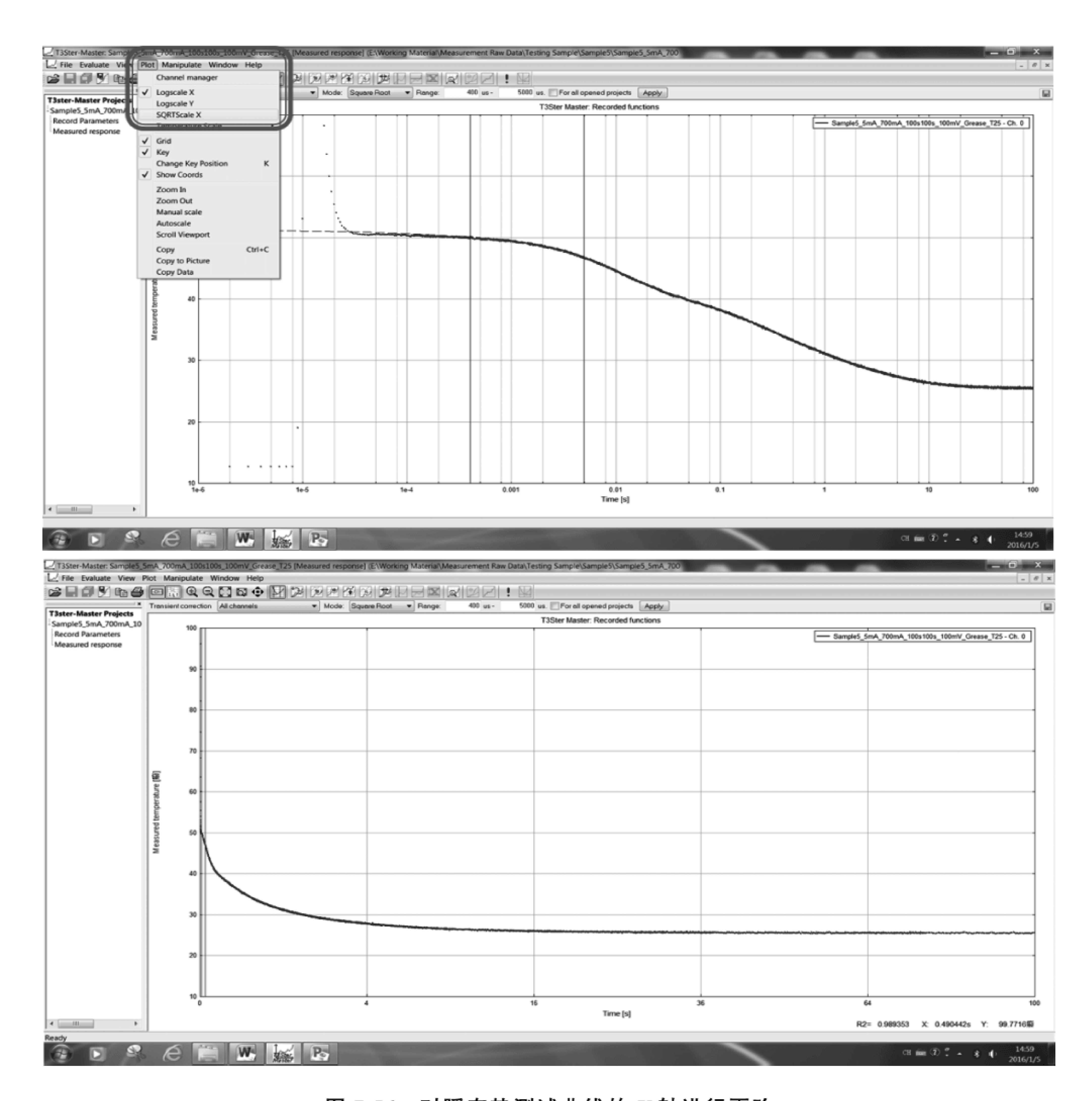


图 7-56　对瞬态热测试曲线的 X 轴进行更改

放大到合适的位置后，单击 Zoom In 图标，关闭放大功能，然后确认是否打开 Transient Correction 功能，并确认是否选择 Square Root 模式，如未打开，则单击 Transient Correction 图标，在出现的下拉列表中选择 Square Root 模式，如图 7-58 所示。

在屏幕上出现两根红线，左侧的红线是切除线，在此线左边的数据被作为初始电气噪音会被去除掉，并被拟合结果代替，拟合的结果在图中显示为虚线。右侧的红线用来选择拟合区间，尽量使拟合的结果和有效的数据成一条直线。调整完毕单击 Save 图标保存。如有多个瞬态热测试曲线同时打开，则选择 For all opened projects 复选框，并单击 Apply 按钮，然后单击 Save all 图标，进行保存，如图 7-59 所示。

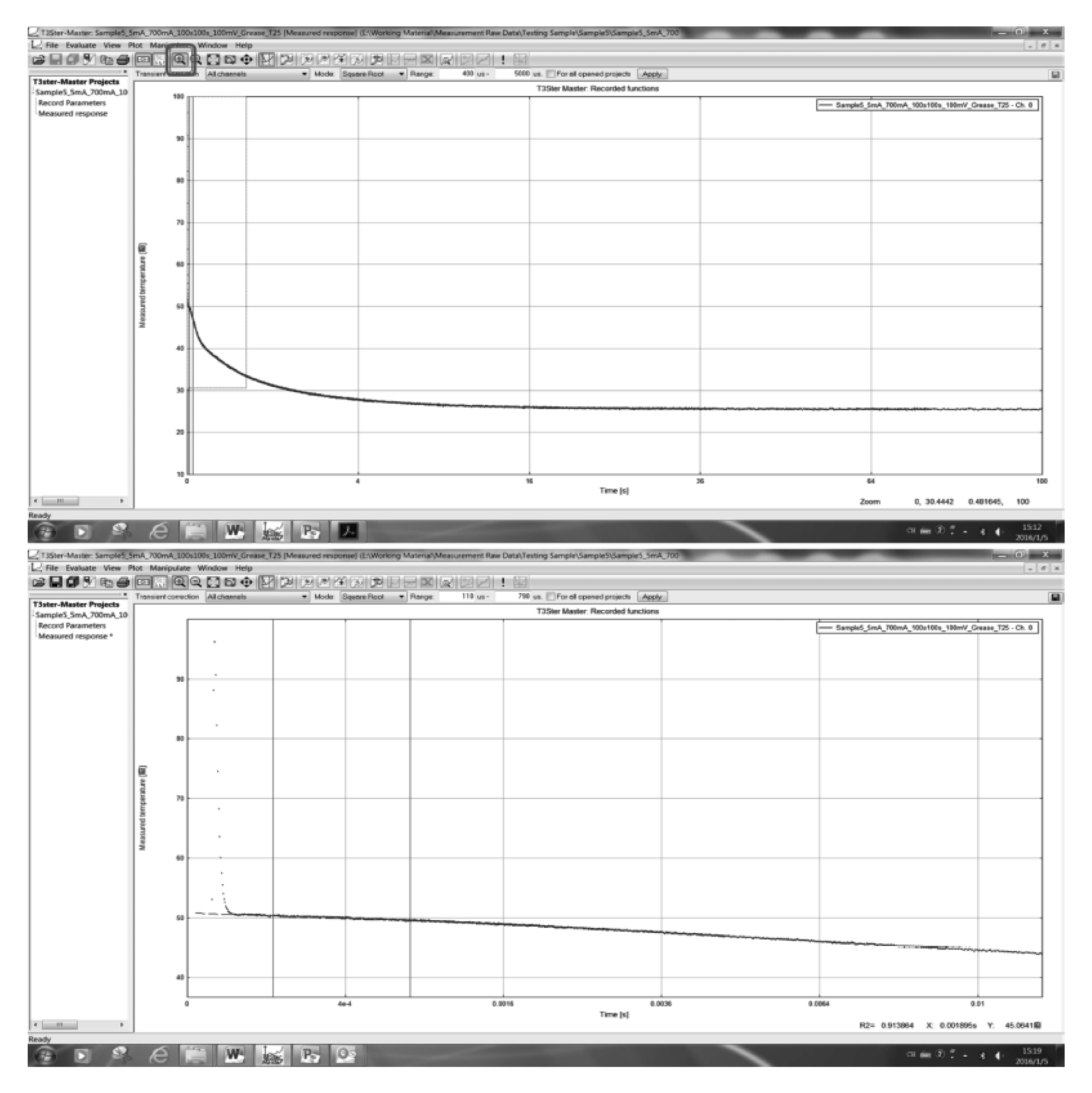


图 7-57　放大瞬态热测试曲线的最初部分

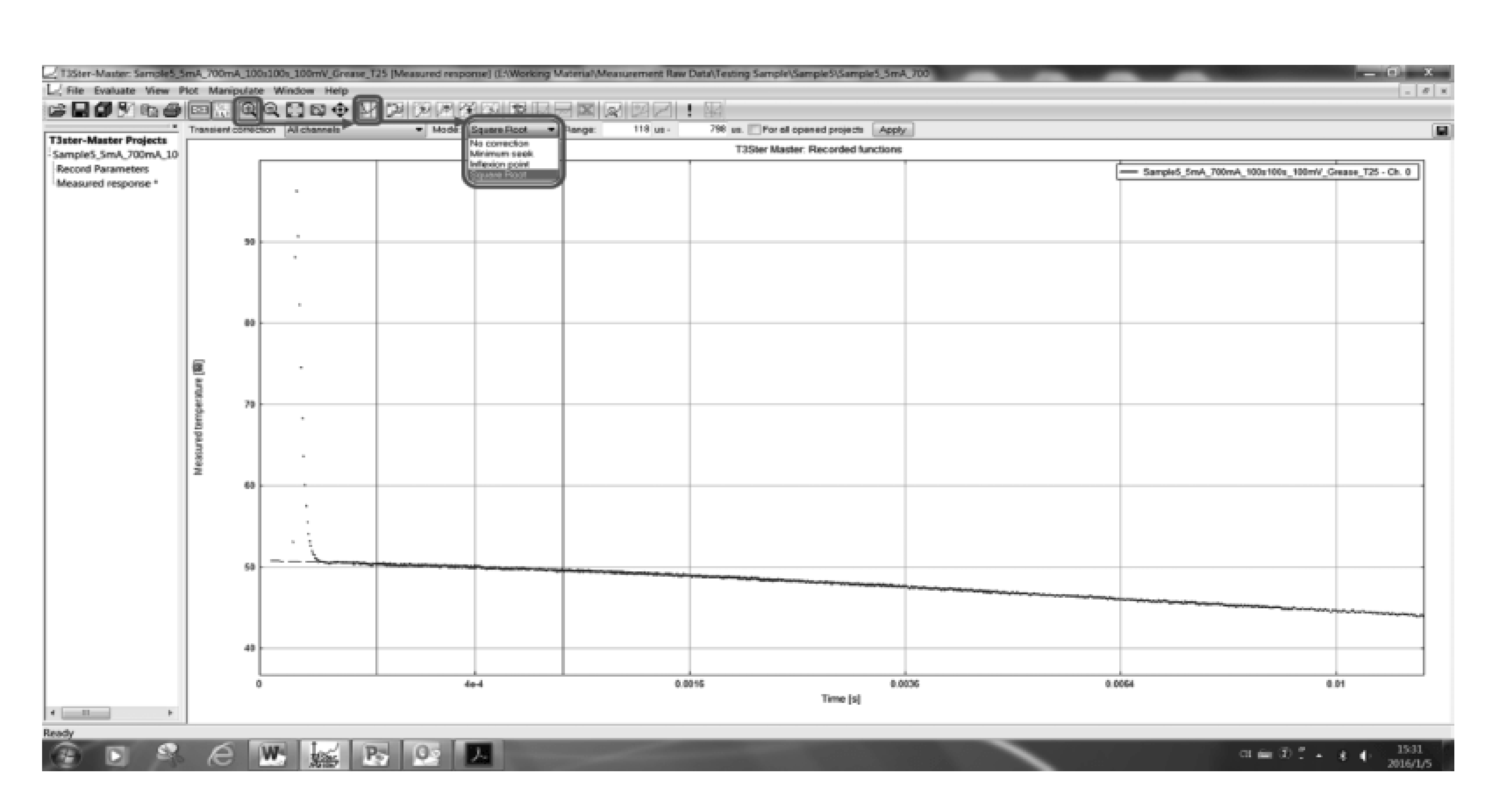


图 7-58　选择正确的去除初始电气噪音的模式

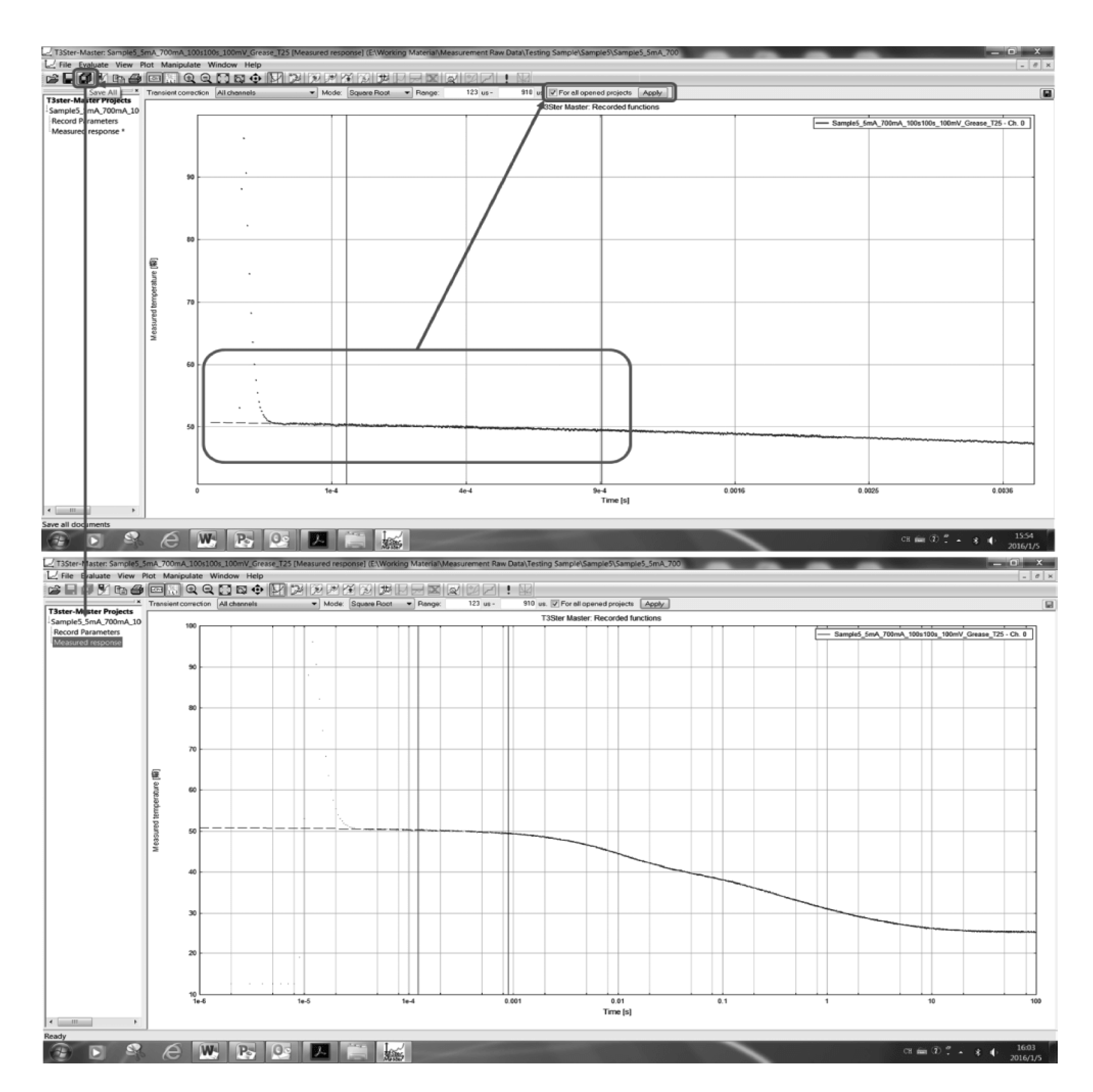


图 7-59 对初始电气噪音进行处理的过程

对于处理完成的瞬态热测试的曲线，Y 轴的读数就是被测 LED 器件被施加 700mA 加热电流后的结温。单击 Turn on/off measurement 功能，选择 Measure vertical 功能，单击屏幕上瞬态热测试曲线在 Y 轴上温度最高的点，可以在瞬态热测试曲线上放置一条 Y 轴数值的测量线，这条线的 Y 轴读数就是被测 LED 器件被施加 700mA 加热电流后的结温。同样在 Y 轴 0℃ 的读数处也放置一条测量线，则两条测量线之间的数值为被测 LED 器件的结温，如图 7-60 所示。

单击 Evaluate 菜单，选择 Evaluate Project 菜单命令，出现 Evaluate 对话框，单击 Start 按钮，对瞬态热测试曲线进行分析，分析完成后，单击 Close 按钮，如图 7-61 所示。

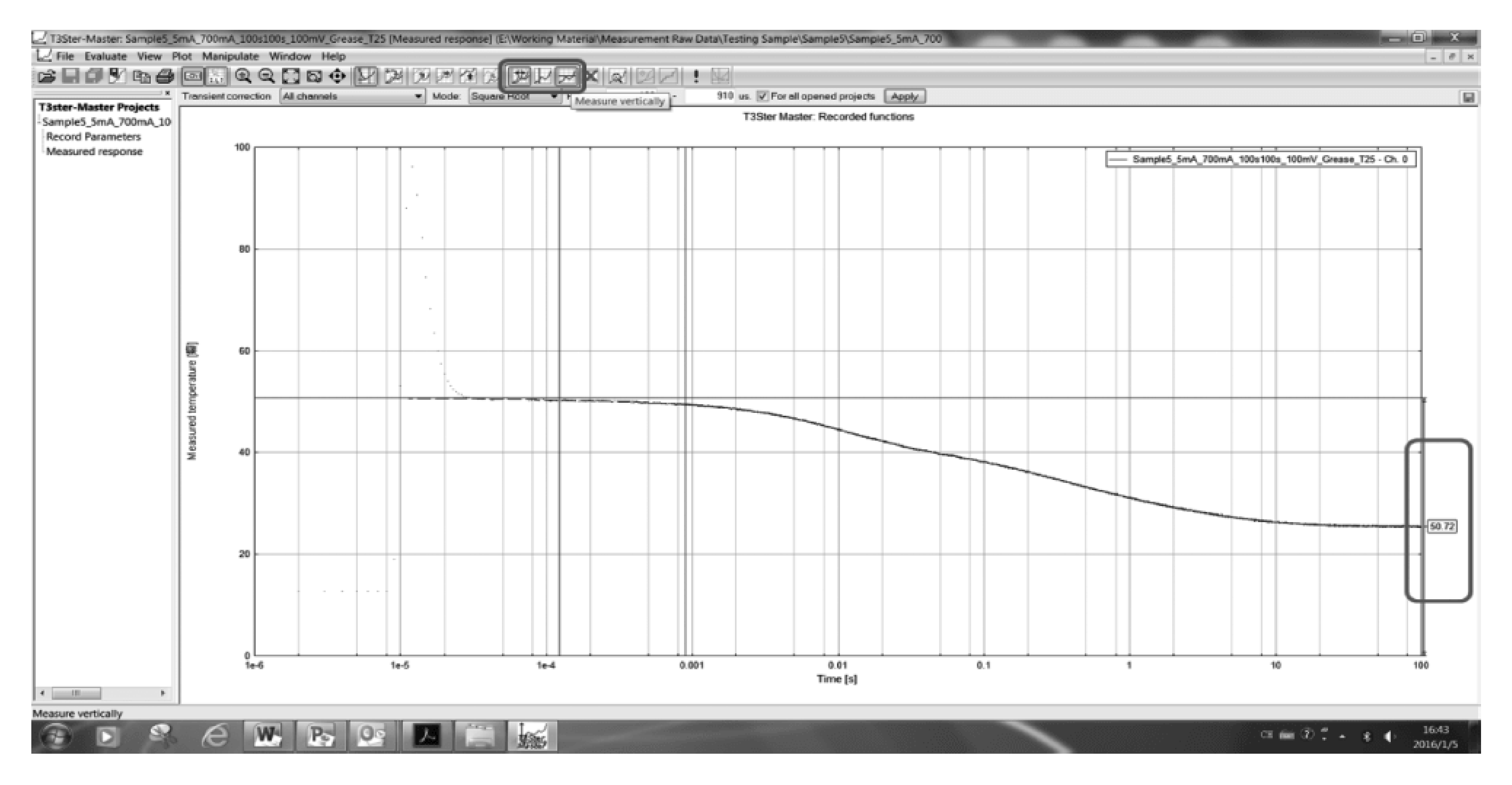


图 7-60　被测 LED 器件结温的获得

分析后的被测 LED 器件的瞬态热测试结果包含以下几个项目：

（1）Smoothed Response 曲线，也就是平滑处理后的结果被显示出来，这条曲线显示了结温相对于环境温度的变化，从中可以进一步分析结温的真实值。在此例中，结温相对于环境温度上升了 25.72℃，则被测 LED 器件的结温为测试环境温度 25℃＋25.72℃＝50.72℃，如图 7-62 所示；

（2）Derivative 曲线，是计算结构函数过程中的一个结果，X 轴是对数时间轴，Y 轴是 Smoothed Response 曲线的 Y 轴温度对 X 轴时间做了一次微分，如图 7-63 所示；

（3）Zth 曲线，也就是瞬态热阻抗曲线，使用该曲线，任何阶跃功率驱动下的被测 LED 器件的瞬态结温都可以很容易获得，只要乘以每个时间点的阶跃功率即可，如图 7-64 所示；

（4）Tau Intensity 曲线，是计算结构函数过程中的一个步骤，是被测 LED 器件的时间常数谱，如图 7-65 所示；

（5）Structure Function (Integral)是积分结构函数曲线，Y 轴是热容，X 轴是热阻。积分结构函数曲线反映了从发热源（原点）到环境（最后直线向上部分）的热流路径上的所有热容与热阻分布。根据结构函数上斜率（热容与热阻的比值）变化，可以区分出代表不同材料的线段。用直观的方式，帮助分析散热路径上不同材料的热阻与热容，如图 7-66 所示；

（6）Structure Function (Differential)是微分结构函数曲线，Y 轴是热容对热阻的一次微分，X 轴是热阻，通过微分结构函数曲线，可以将拐点的变化辨识得更清楚，如图 7-67 所示。

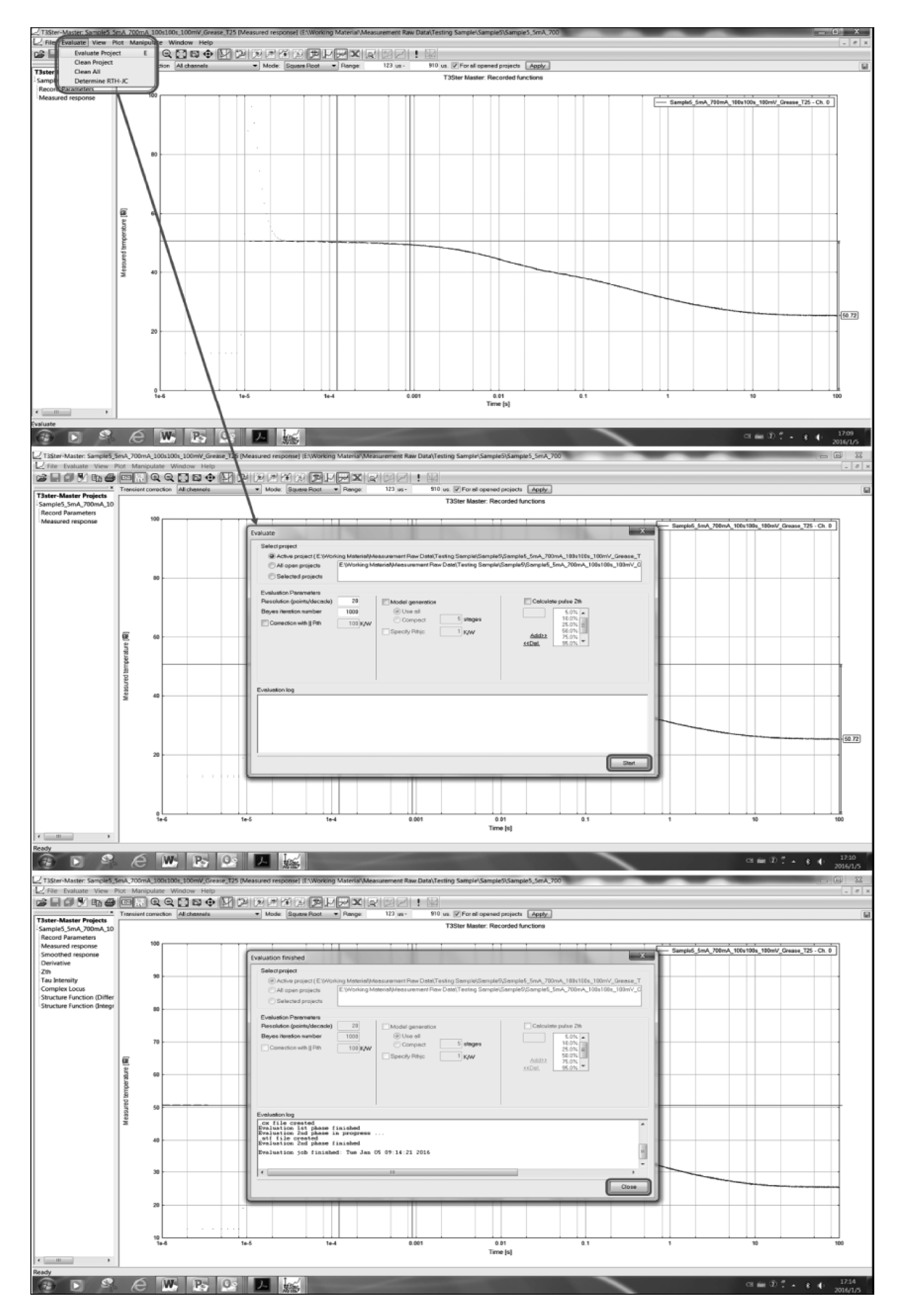


图 7-61　对瞬态热测试的曲线进行分析

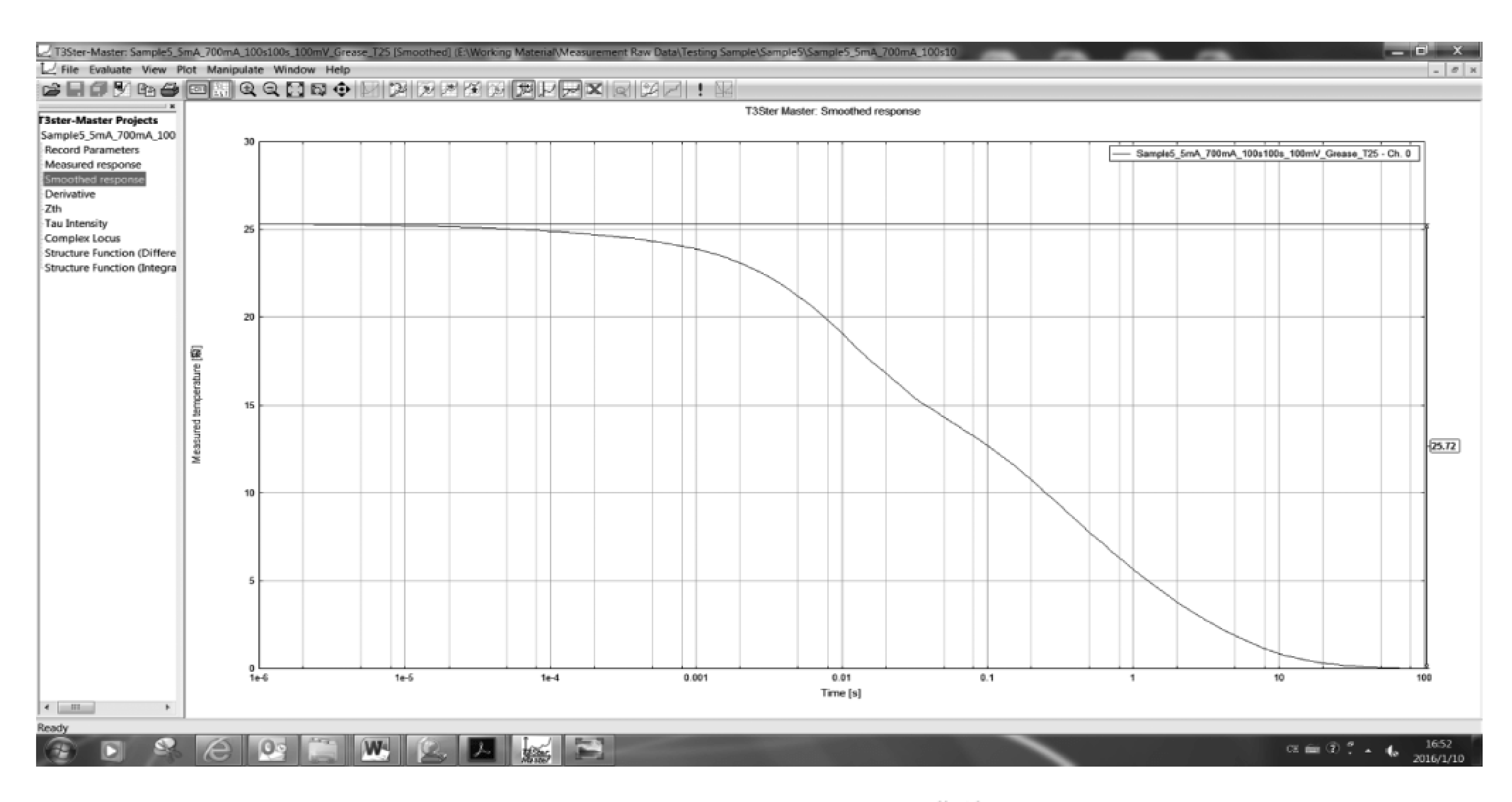


图 7-62 **Smoothed Response 曲线**

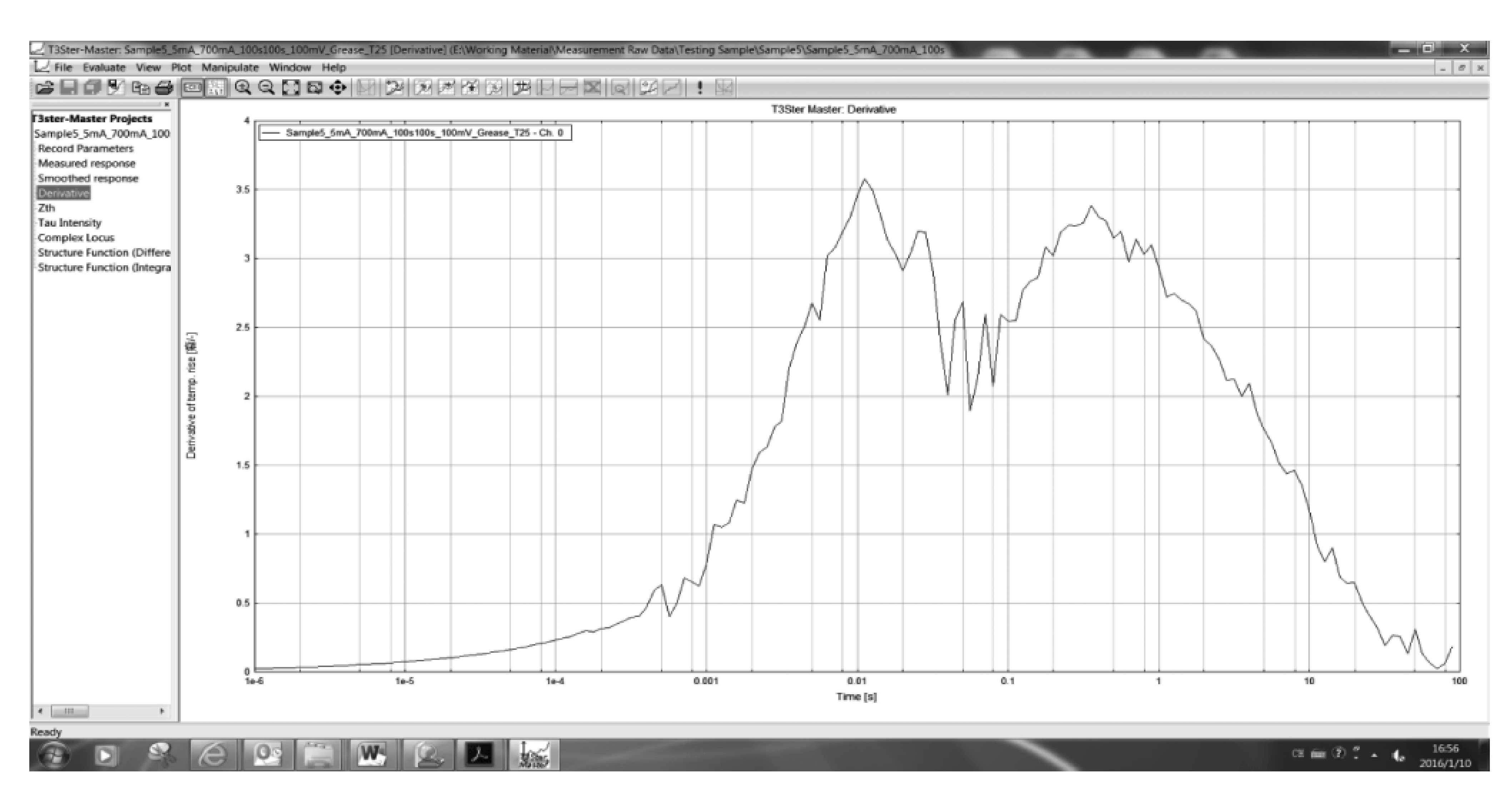


图 7-63 **Derivative 曲线**

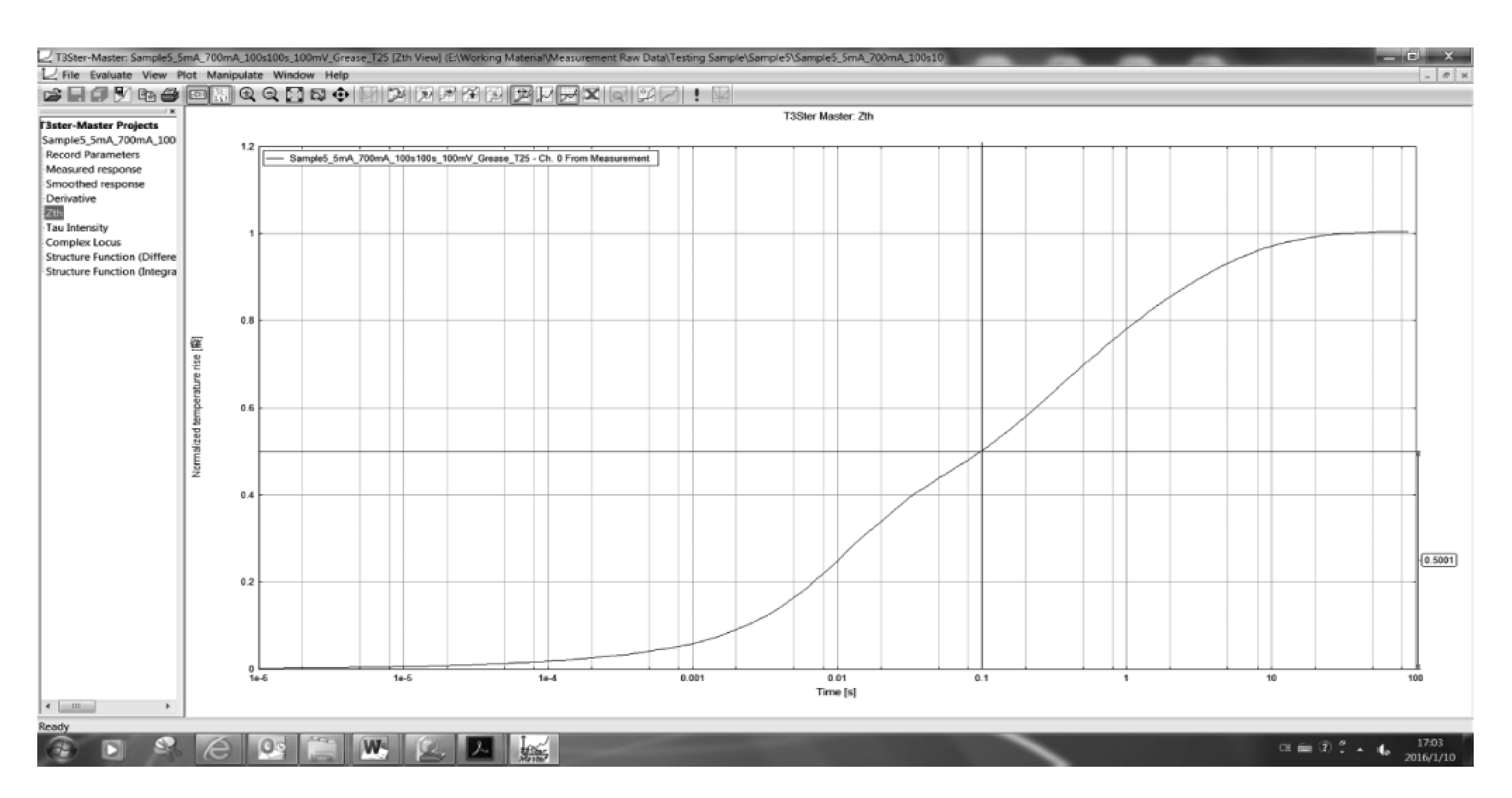


图 7-64　Zth 曲线

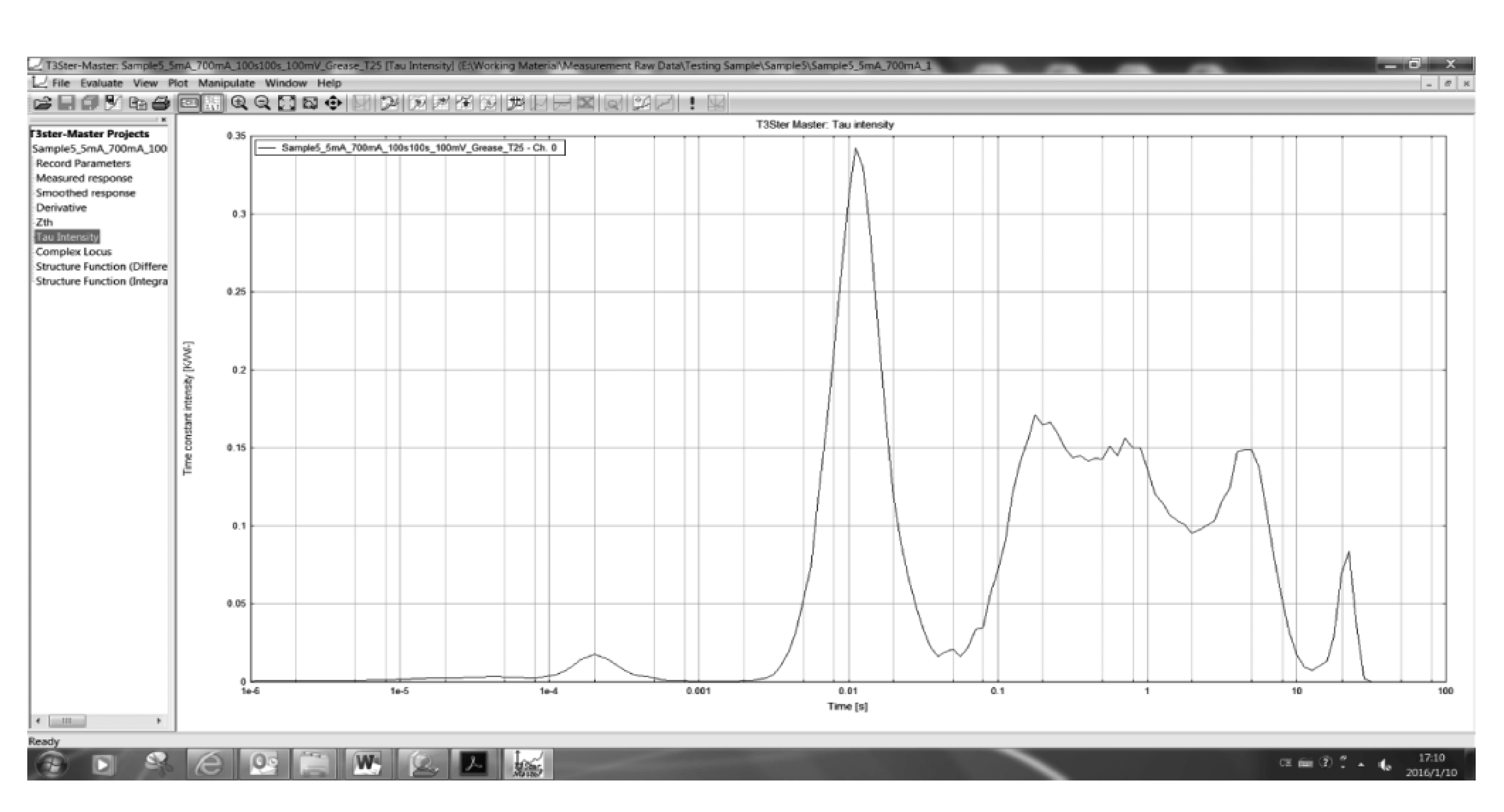


图 7-65　Tau Intensity 曲线

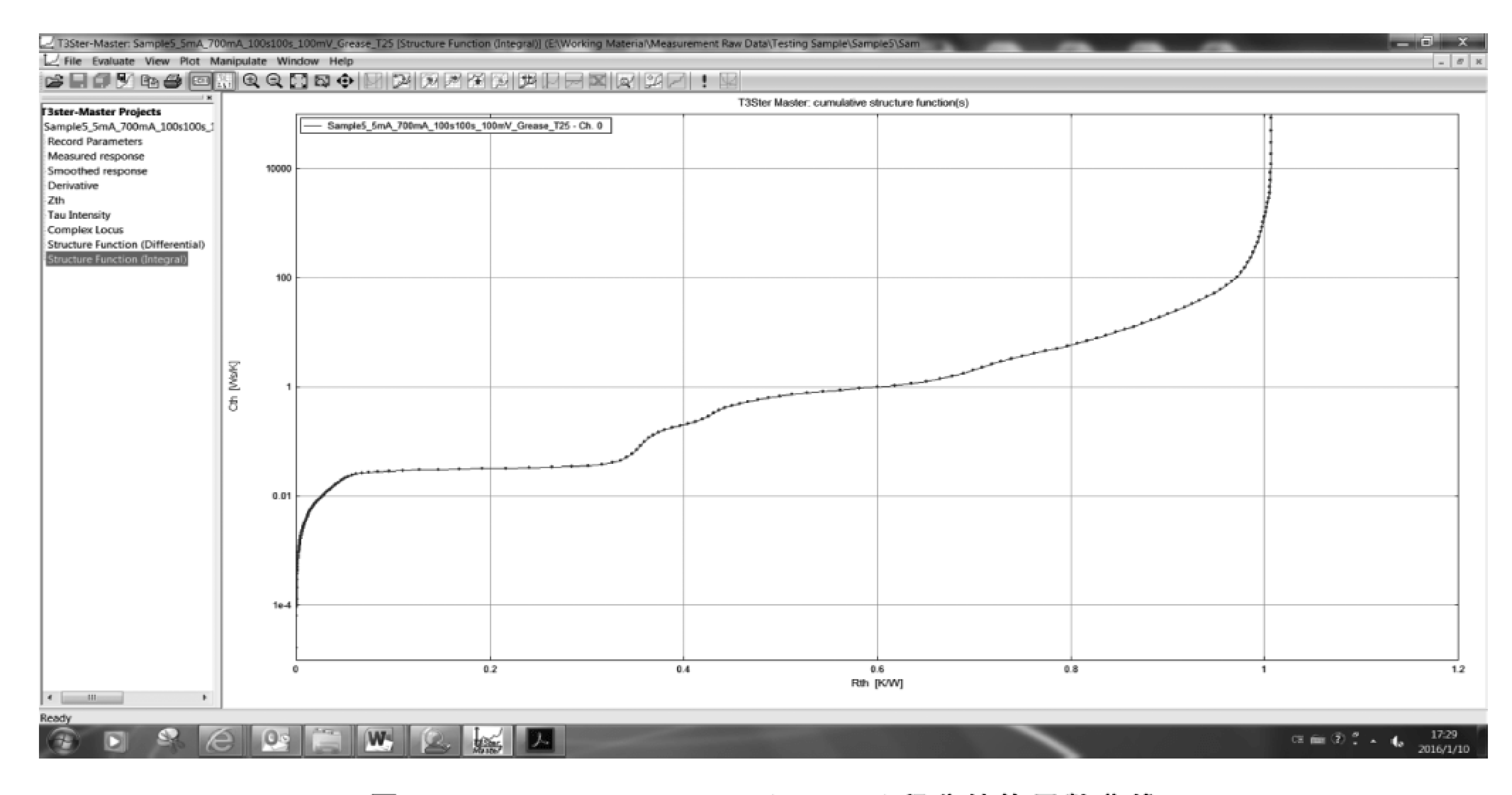


图 7-66　Structure Function (Integral)积分结构函数曲线

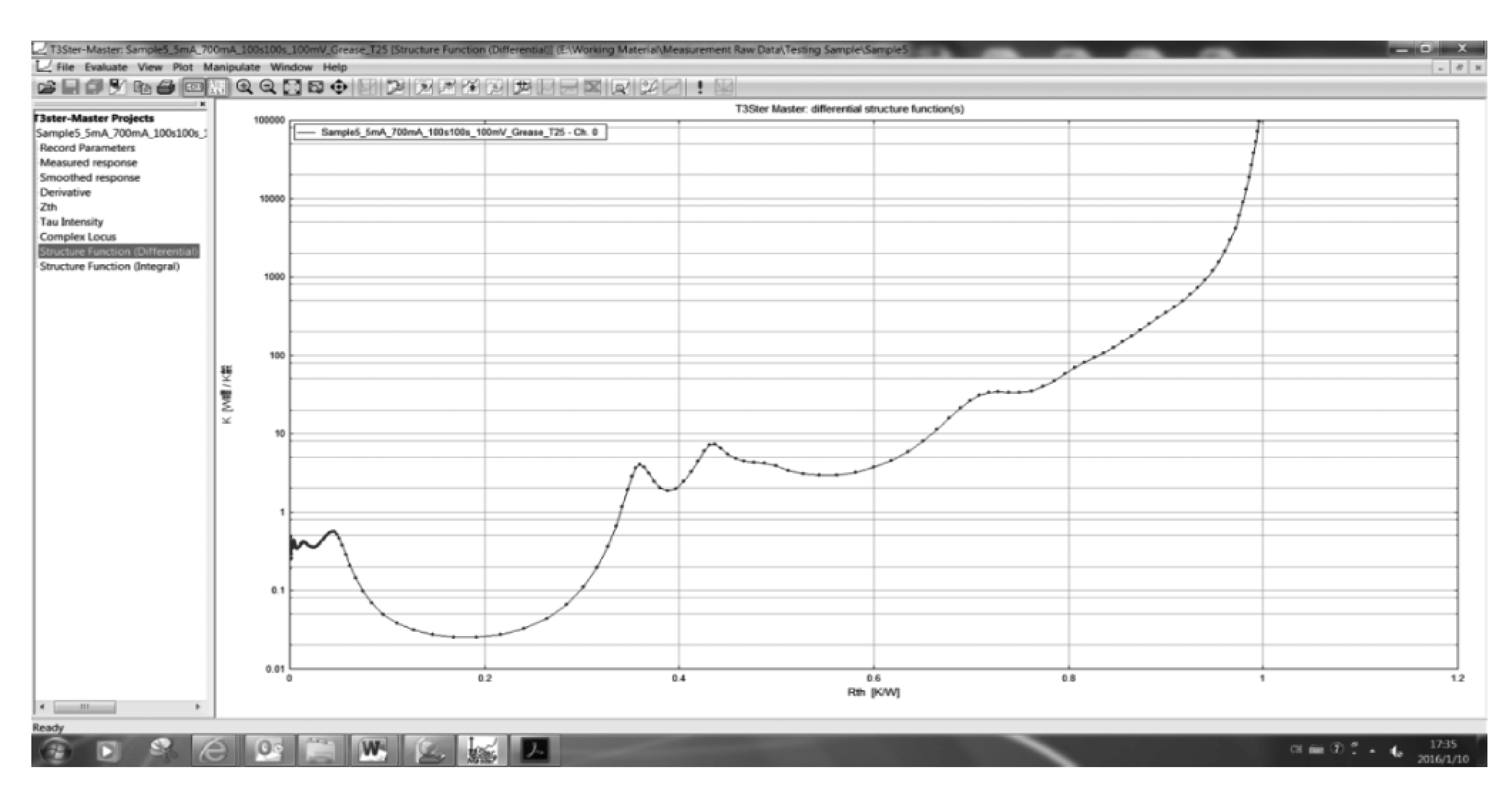


图 7-67　Structure Function (Differential)微分结构函数曲线

7.2.4 使用瞬态双界面法获得被测 LED 器件的结壳热阻

根据 JESD51-14 标准中的瞬态双界面测试方法，第一次将被测 LED 器件直接放在控温冷板上测试，第二次将被测 LED 器件的底面涂抹导热硅脂后放在控温冷板上再次测试。两次测试结果转换成结构函数曲线后，结构函数的分歧点 X 轴读数即为被测 LED 器件的结壳热阻值。

1. 积分结构函数曲线的对比

分别打开被测 LED 器件直接放在控温冷板上和通过导热硅脂放在控温冷板上的瞬态热测试结果，选择 Structure Function（Integral）结果曲线，单击 Add foreign plot 图标，出现 Add/Remove Foreign Plots 对话框，如图 7-68 所示。

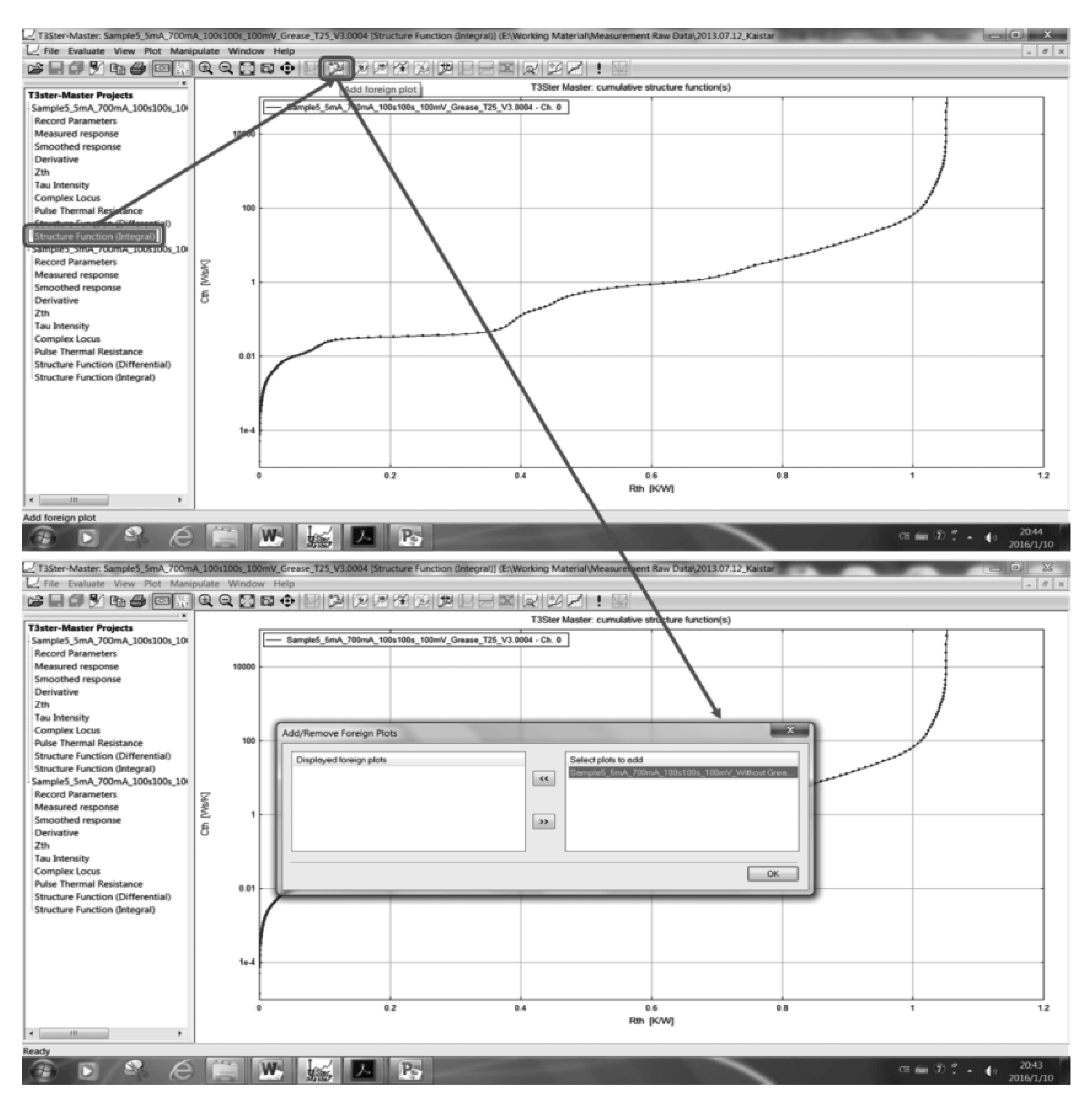


图 7-68 出现 Add/Remove Foreign Plots 对话框

在 Add/Remove Foreign Plots 对话框的 Select plots to add 列表中，选择要被添加的积分结构函数曲线，并单击向左箭头，进行添加，添加成功后，在 Displayed foreign plots 列表出现添加的积分结构函数曲线，单击 OK 按钮，完成添加，如图 7-69 所示。

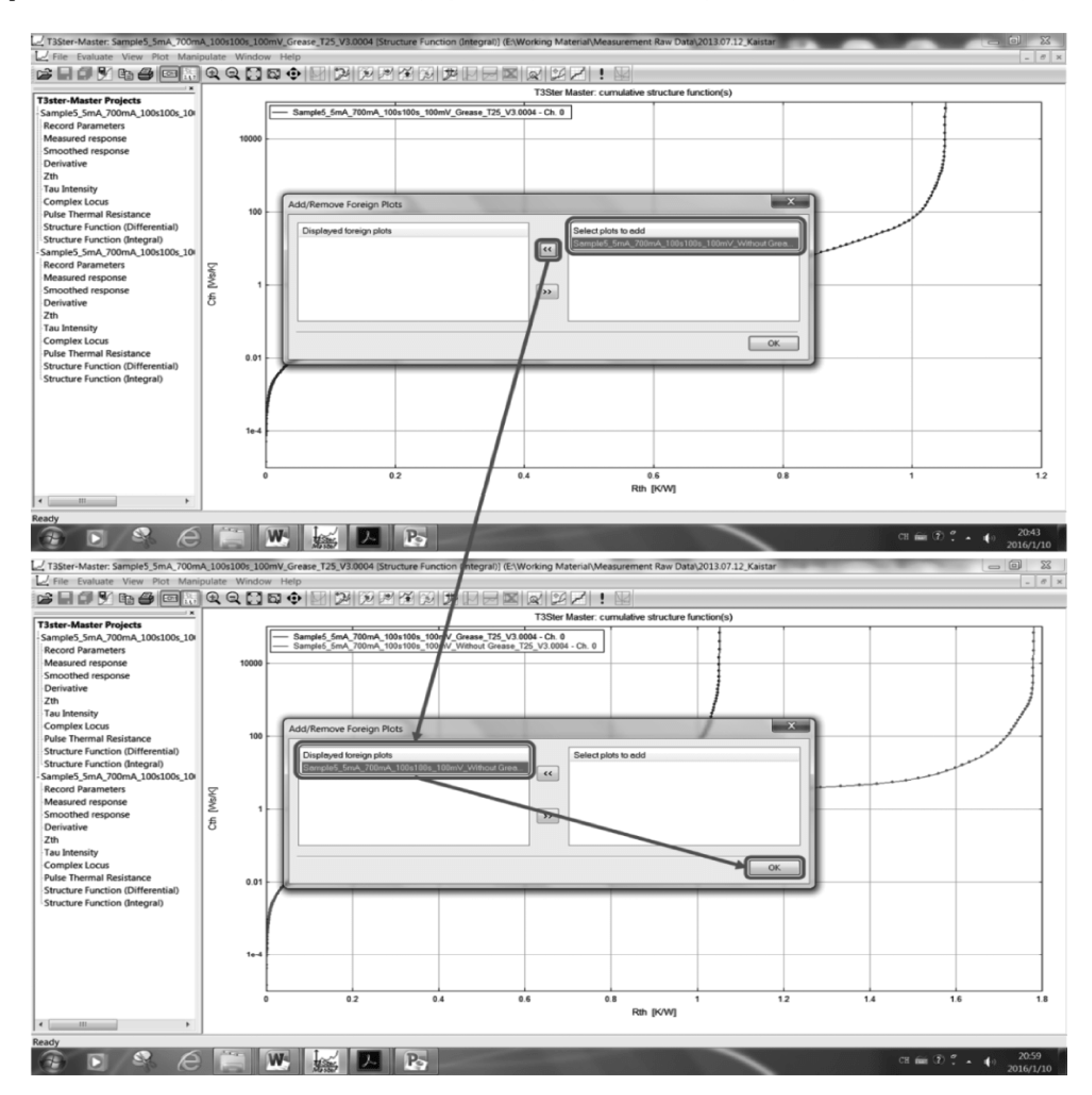


图 7-69 积分结构函数曲线添加的完成

将得到的两条积分结构函数曲线放在一起对比，并使用画线功能，可知被测 LED 器件的结壳热阻为 0.5252K/W，如图 7-70 所示。

2. 微分结构函数曲线的对比

按照同样的方式，进行微分结构函数曲线的对比，由于微分结构函数曲线的 Y 轴是积分结构函数曲线的 Y 轴对 X 轴做了一次微分，所以分歧点的辨识更加清晰，通过微分

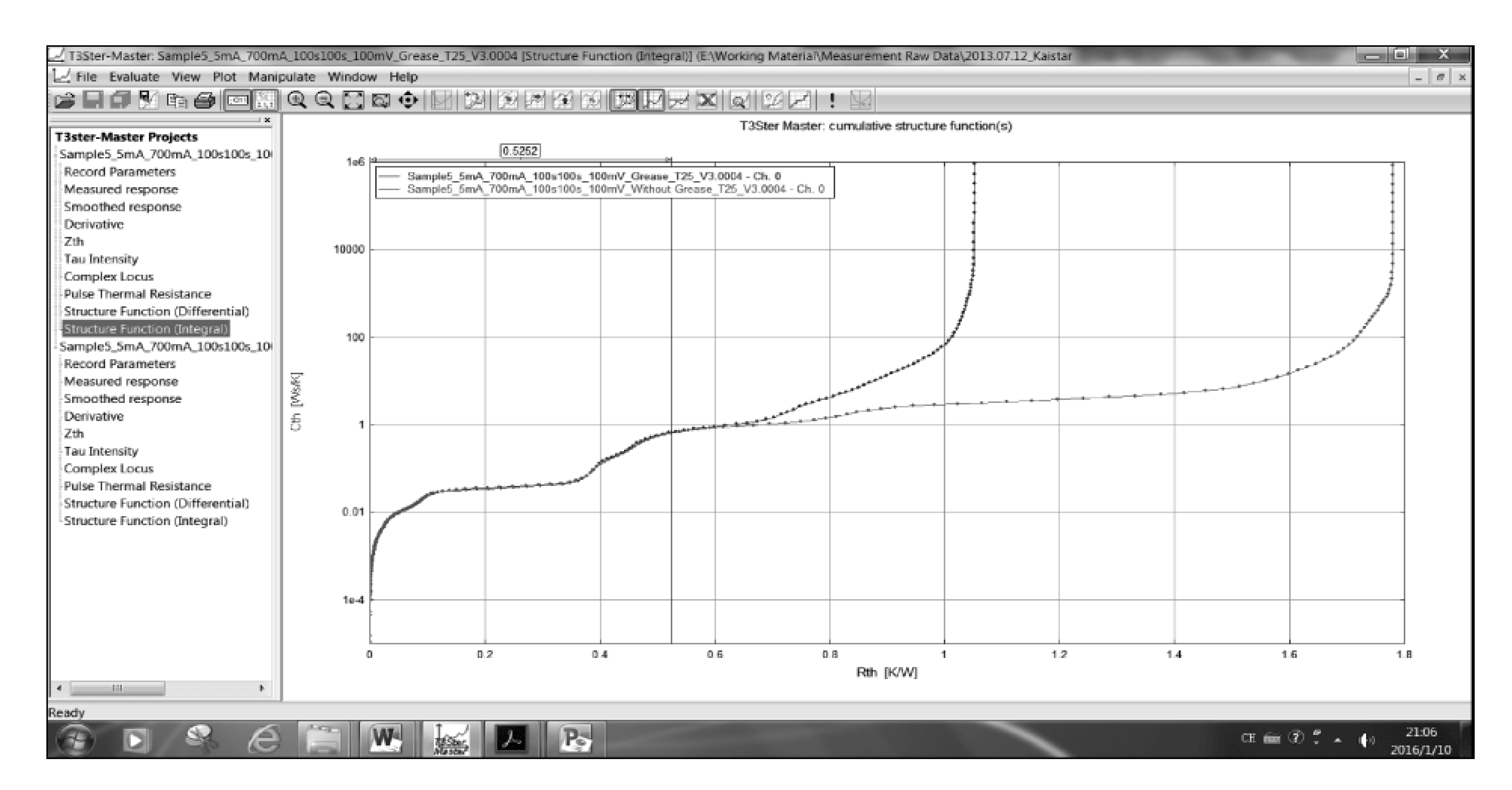


图 7-70　通过积分结构函数曲线获得被测 LED 器件的结壳热阻

结构函数曲线的对比，可知被测 LED 器件的结壳热阻为 0.5252K/W，如图 7-71 所示。

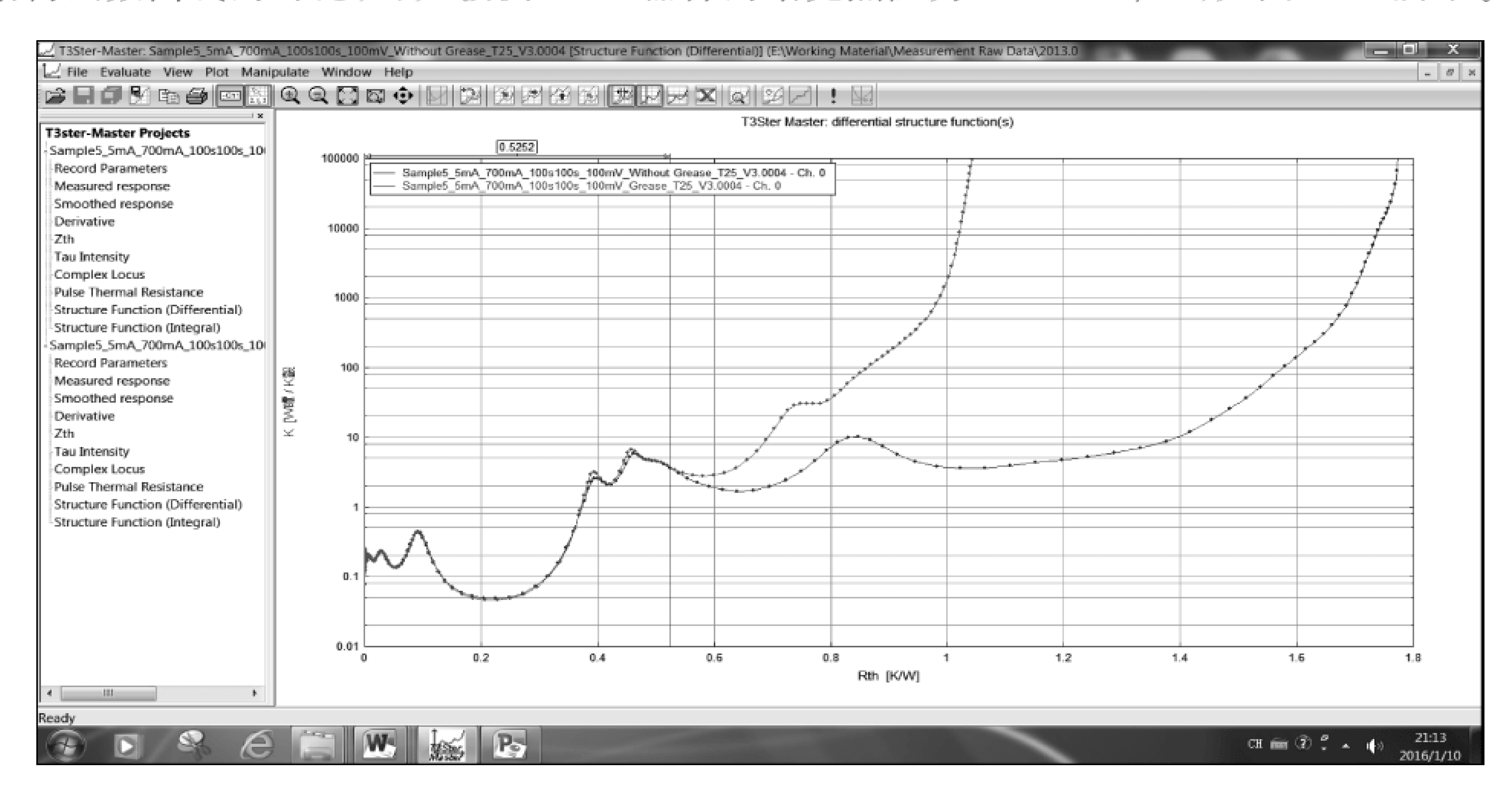


图 7-71　通过微分结构函数曲线获得被测 LED 器件的结壳热阻

3. 瞬态热阻抗曲线的对比

按照同样的方式，进行瞬态热阻抗曲线的对比，从瞬态热阻抗曲线的对比可知，被测 LED 器件的结壳热阻为 0.5252K/W，热量到达被测 LED 器件外壳的时间为 0.0934 秒，如图 7-72 所示。

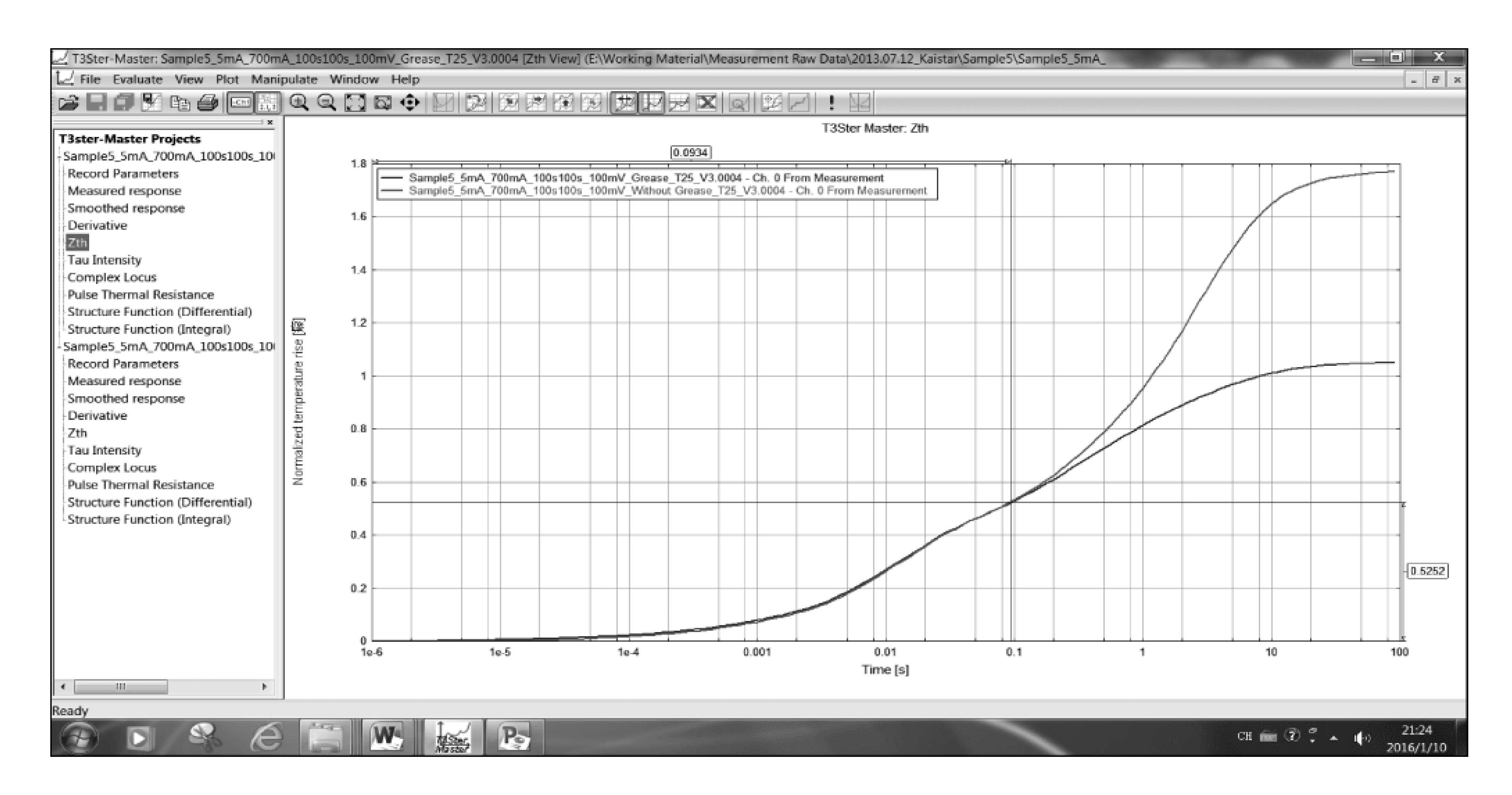


图 7-72　瞬态热阻抗曲线的对比

7.2.5　RC Compact Model 的生成

T3Ster-Master 评估分析软件可以生成 RC Compact Model 直接供 Flotherm 以及 FloEFD 仿真分析软件使用，减少建模的时间，提高仿真的精度和效率。

在完成分析的被测 LED 器件瞬态热测试的结果中，单击 Structure Function (Integral)结果，显示积分结构函数曲线。单击 Evaluate 菜单，选择 Evaluate Project 菜单命令，出现 Evaluate 对话框。

在 Evaluate 对话框中，选中 Model generation 复选框，选择 Compact 单选按钮，并在 Stages 栏前边的空白处填入被测 LED 器件 Package 的层数，此例中 COB 封装的 LED 器件分为 3 层，包括 LED Die、Glue 以及 MCPCB，因此在 Stages 前边的空白处填入 3。

选中 Specify Rthjc 复选框，并填入被测 LED 器件的结-壳热阻值，此例中，被测 LED 器件的结壳热阻为 0.5252K/W，因此填入 0.5252，然后单击 Start 按钮，如图 7-73 所示。

分析完成后，单击 Close 按钮，出现积分结构函数曲线，单击 Show compact model 图标，在积分结构函数曲线上出现 RC Compact Model，如图 7-74 所示。

在被测 LED 器件的瞬态热测试文件中，找到后缀名为.SP0 的文件，用记事本将其打开，可以发现 RC Compact Model 的 R 值和 C 值被记录在文件中，如图 7-75 所示。

瞬态热测试完成后，可以直接将此 RC Compact Model 输入到 Flotherm 和 FloEFD 仿真分析软件中使用。

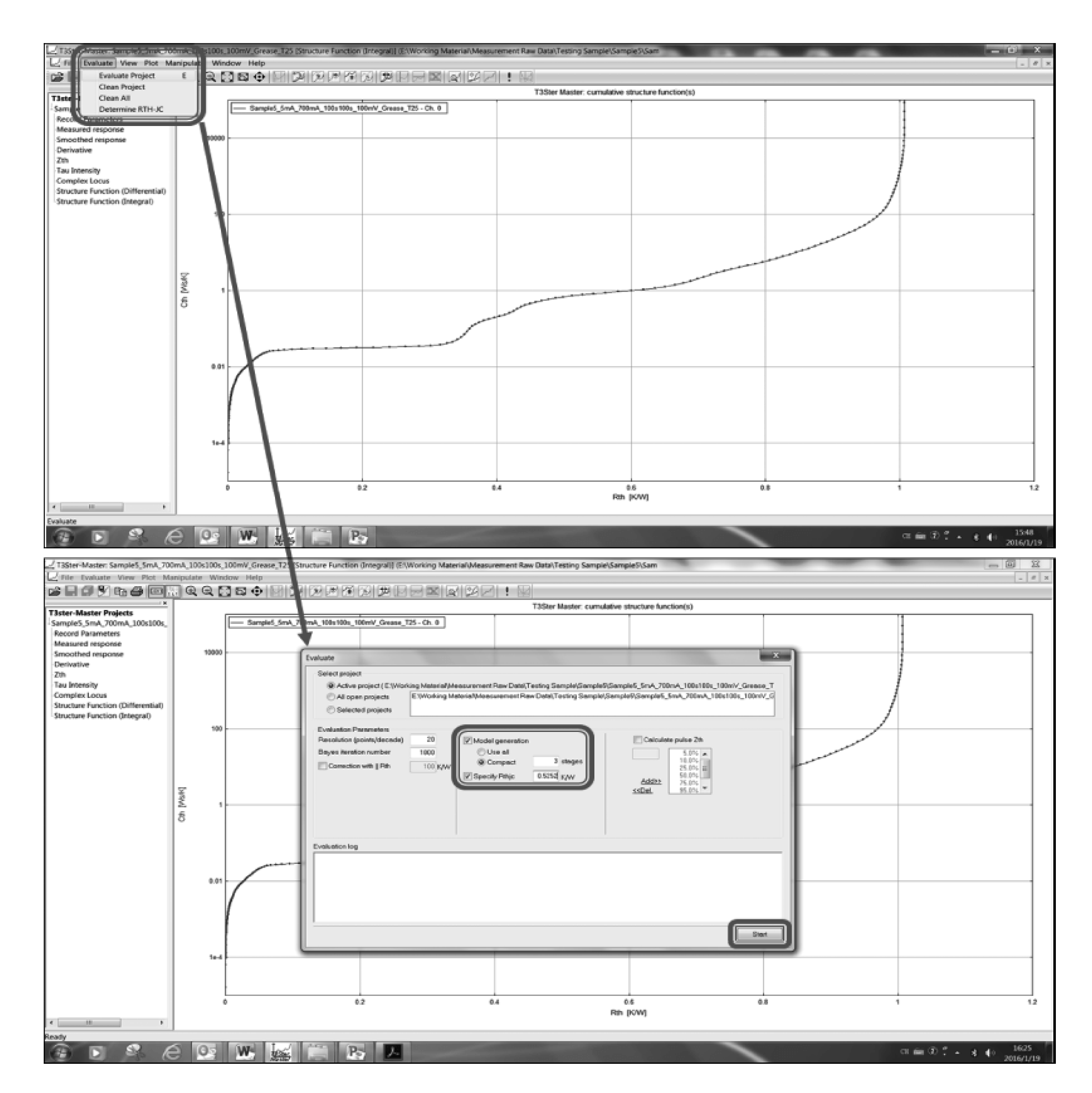


图 7-73　Model Generation 的选择

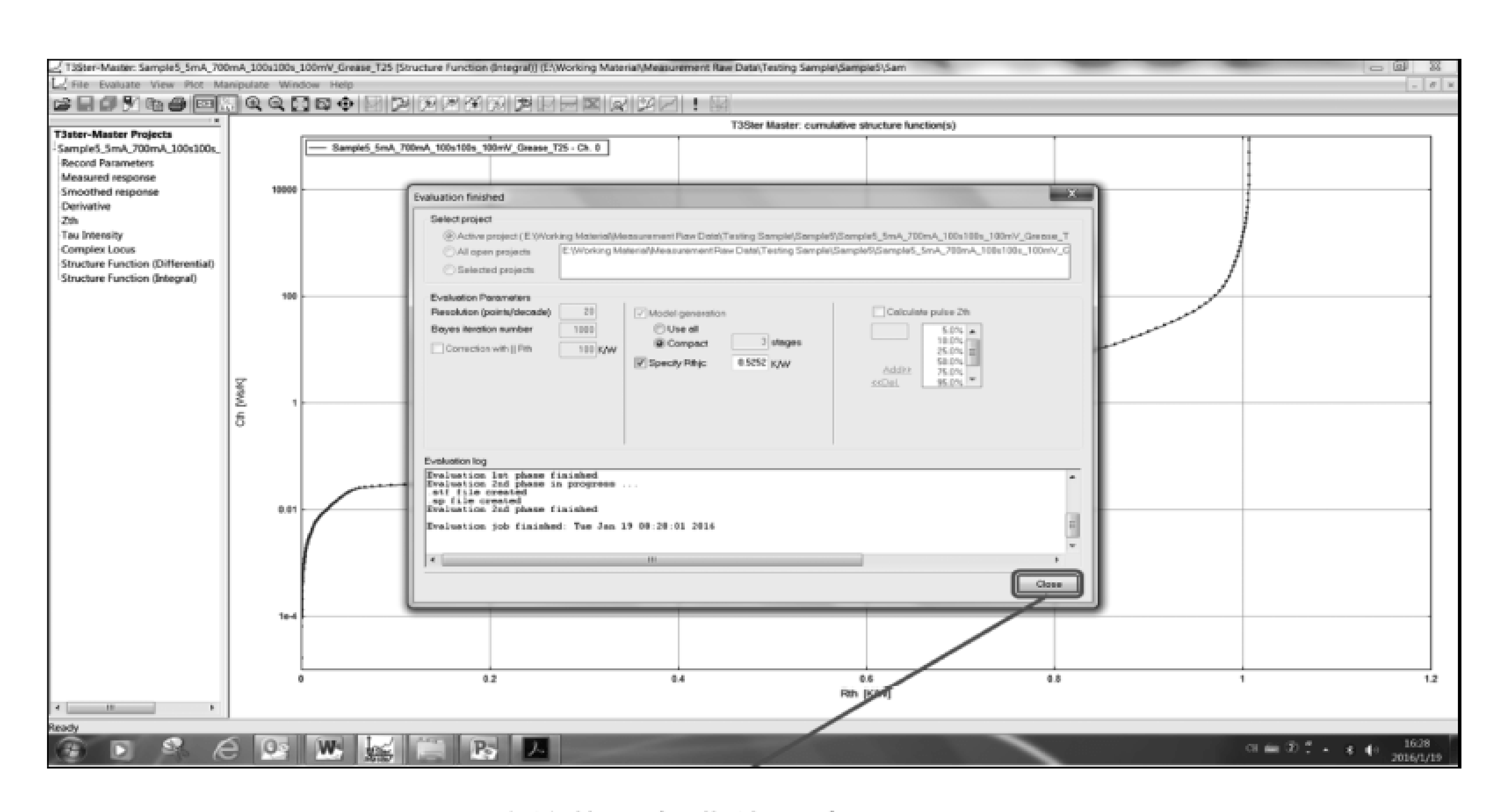


图 7-74　积分结构函数曲线上出现 RC Compact Model

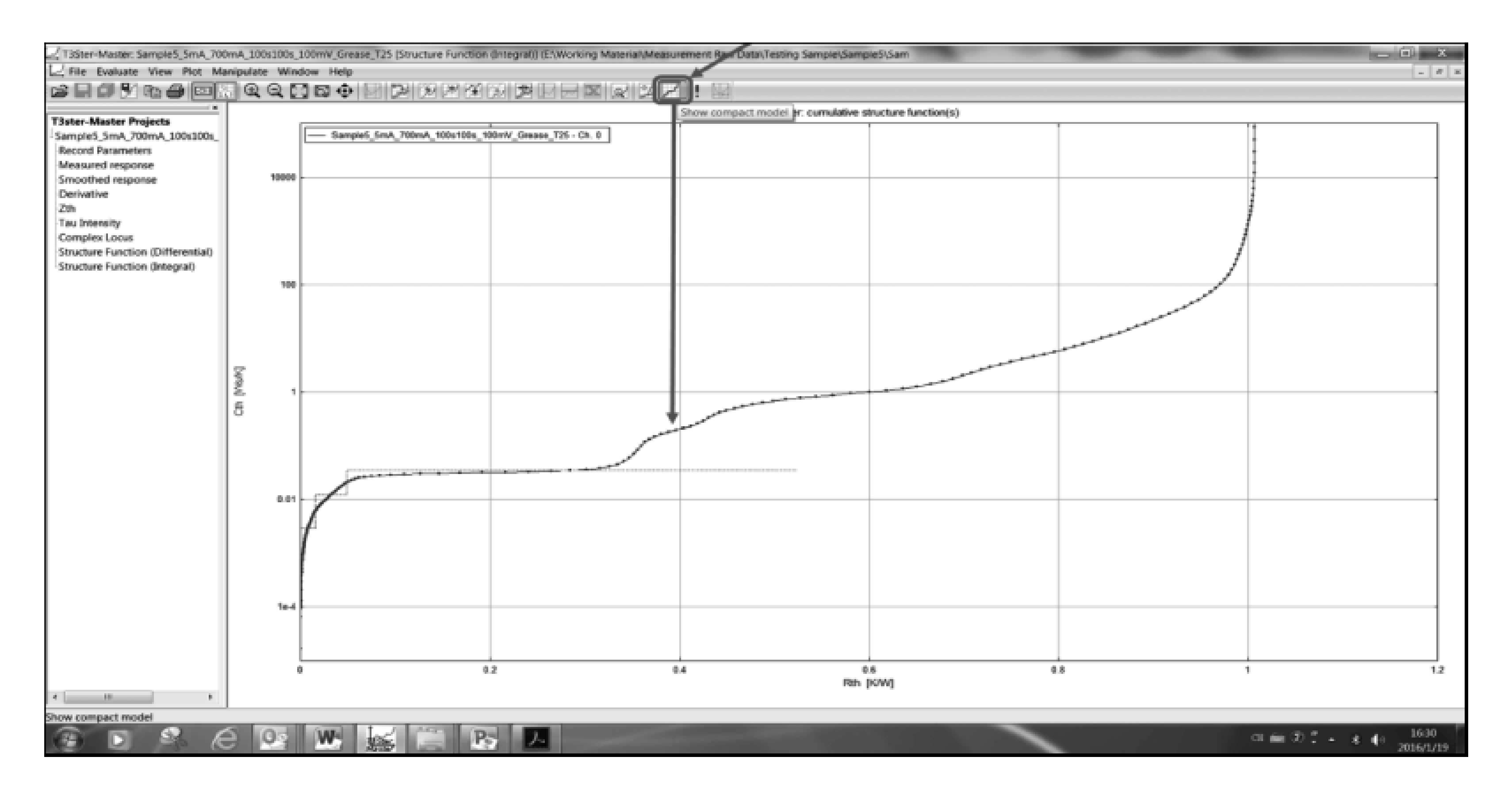


图 7-74 （续）



图 7-75 找到记录 RC Compact Model 的原始文件

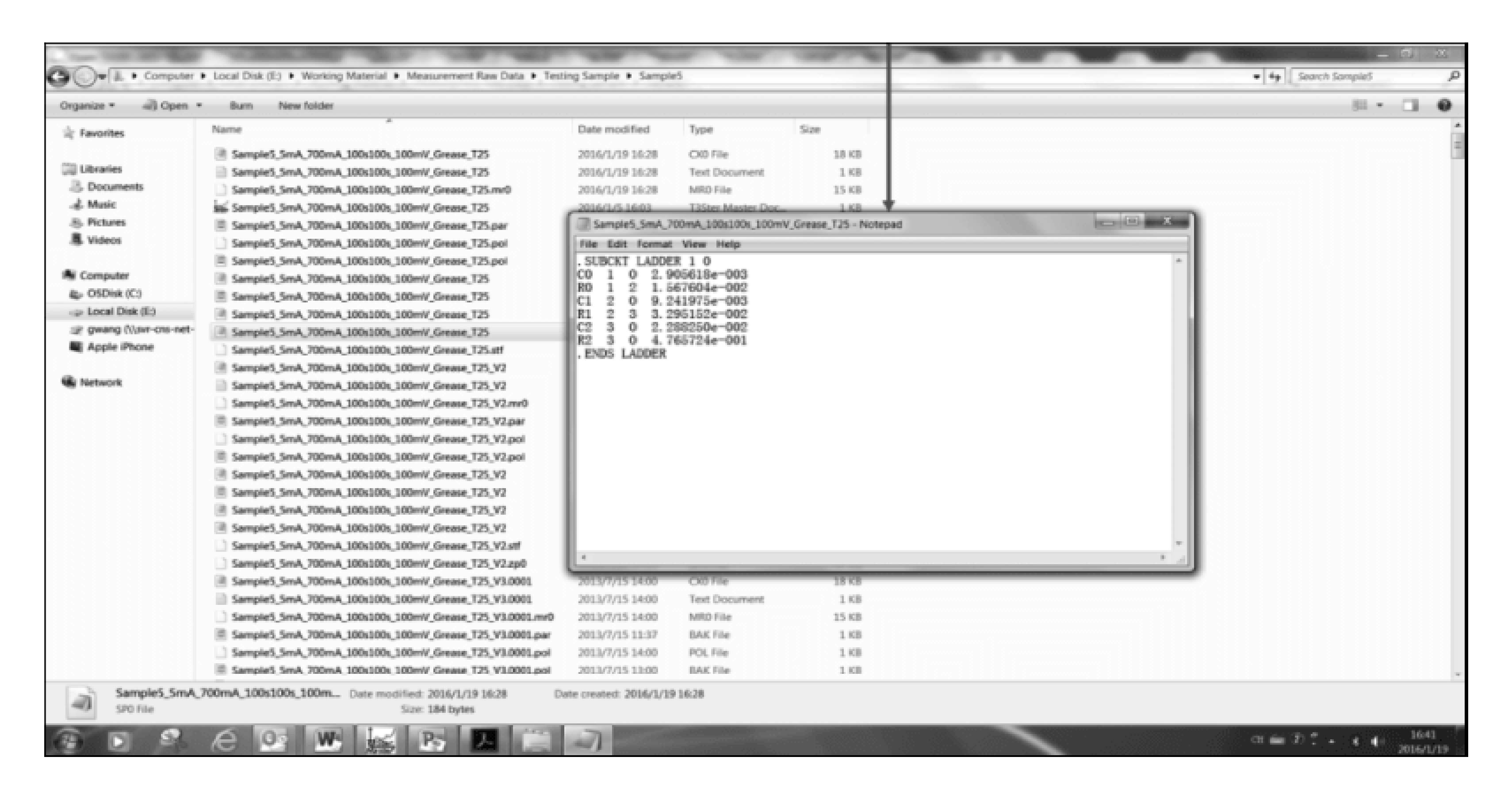


图 7-75 （续）

思考题

1. 如果待测 LED 器件与冷板间没有涂覆界面材料(如导热硅脂),试讨论测试结果与本章所述的结果有何异同。

2. 如果在待测 LED 器件与冷板间涂覆导热硅脂,并用螺钉将它们压紧,试讨论测试结果与本章所述的结果有何异同。

3. 在思考题 1 和 2 的基础上,思考并设计一种测量界面材料热性能(热阻和导热系数等)的方法。

4. 如果待测 LED 器件为普通的单 pn 结 LED 器件,测试过程与本章 COB-LED 器件的测试结果有何异同?

5. 如果待测的为 LED 灯具(如 LED 球泡灯),测试过程与本章 COB-LED 器件的测试结果有何异同? 试讨论此时测得的球泡灯结温的物理意义。



下篇　LED热设计仿真工具原理与应用

第8章 LED热仿真分析软件介绍

8.1 热仿真分析软件的背景及原理

本书介绍的热仿真软件 FloEFD 基于计算流体动力学(computational fluid dynamics,CFD)原理开发。计算流体动力学是 20 世纪流体力学领域的重要技术之一,它以电子计算机为工具,应用各种离散化的数学方法,对流体力学问题进行数值实验、计算机模拟和分析研究,最终解决各种实际问题。

使用偏微分方程组描述实际流体的运动物理场,计算流体动力学最基本的出发点是考虑如何把连续流体问题在计算机上采用离散点的方式来处理。一个方法是把空间区域离散成小的控制单元,在整个计算空间形成立体网格或者节点,然后针对这些网格或节点应用合适的算法求解响应的物理方程。根据求解问题的特点以及所应用的计算方法,形成的网格可以是规则的,也可以是不规则的。对于一些复杂问题,如动态流动模拟等,复杂算法还可以生成随时间或物理量变化的动态调整的网格。通常把网格的划分过程叫做 CFD 计算的前处理。

常见的离散化方法包括有限体积法、有限元法、有限差分法和边界元法等。其中有限体积法也称之为有限容积法,是最经典或者说最标准的方法,在商用软件中最为常见,包括本书介绍的 FloEFD 软件也是使用这一方法。在有限体积法中,控制方程是在离散的控制体积上求解,普遍认为这一方法更适用于求解流体运动的特性问题。而其他几种离散方法则适用于其他一些场合,如有限元法较多用于固体结构的分析,有限差分法则因易于理解和编程也被广泛应用。

任何流体运动的规律都是以质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律为基础的。这些基本定律可由数学方程组来描述,计算流体动力学可以看作是在流动基本方程控制下对流体的数值仿真模拟。对于应用于网格之上的流体运动控制方程最常用的是 N-S 方程组。该方程组以克劳德-路易・纳维(Claude-Louis Navier)和乔治・盖伯利尔・斯托克斯(George Gabriel Stokes)命名,是一组描述像液体和

空气这样连续流动介质的方程。对于一些复杂问题，如燃烧、磁流体的运动等，除基本的守恒方程外，还会加入其他的化学、电磁学等方程。通过对控制方程组的求解，获得模型各物理量在空间及时间上的分布状况，从而实现仿真的目的。这一过程称之为 CFD 的计算求解。

通过上述求解后得到的结果是离散后各网格内部(或节点上)的数值，这样的结果并不直观，难以被一般工程技术人员或其他相关人员理解。因此将求解结果的速度场、温度场或压力场等表示出来就成了 CFD 技术应用的重要部分。通常把这部分工作称为 CFD 计算的后处理。CFD 后处理软件或模块通过计算机图形学等技术，可以将我们所求解的速度场和温度场等形象、直观地表示出来，产生速度分布矢量图、温度分布云图等。通常用矢量箭头的大小表示速度大小，云图颜色的暖冷表示温度、浓度或压力等物理量的高低。CFD 的后处理不仅能显示静态的速度、温度场等分布图，而且还能显示流场的流线或迹线等分布动画，非常形象生动。

概括起来，计算流体动力学以理论流体力学和计算数学为基础，是这两门学科的交叉学科，主要研究把描述流体运动的连续介质数学模型离散成大型代数方程，建立在计算机上求解的算法，并将计算结果以便于人们理解的方式展现出来。

8.2 FloEFD 特点和优势

FloEFD 完全嵌入至主流 MCAD 软件中，相对 Creo、CATIA、Solidworks 和 NX 等主流三维 CAD 软件的模型数据而言，其不存在数据的转化过程。同时，FloEFD 软件可以自动识别流体流动区域，省略建立流动区域模型的工作。如图 8-1 所示，FloEFD 软件可以自动识别发动机水套内部流体流动的区域。

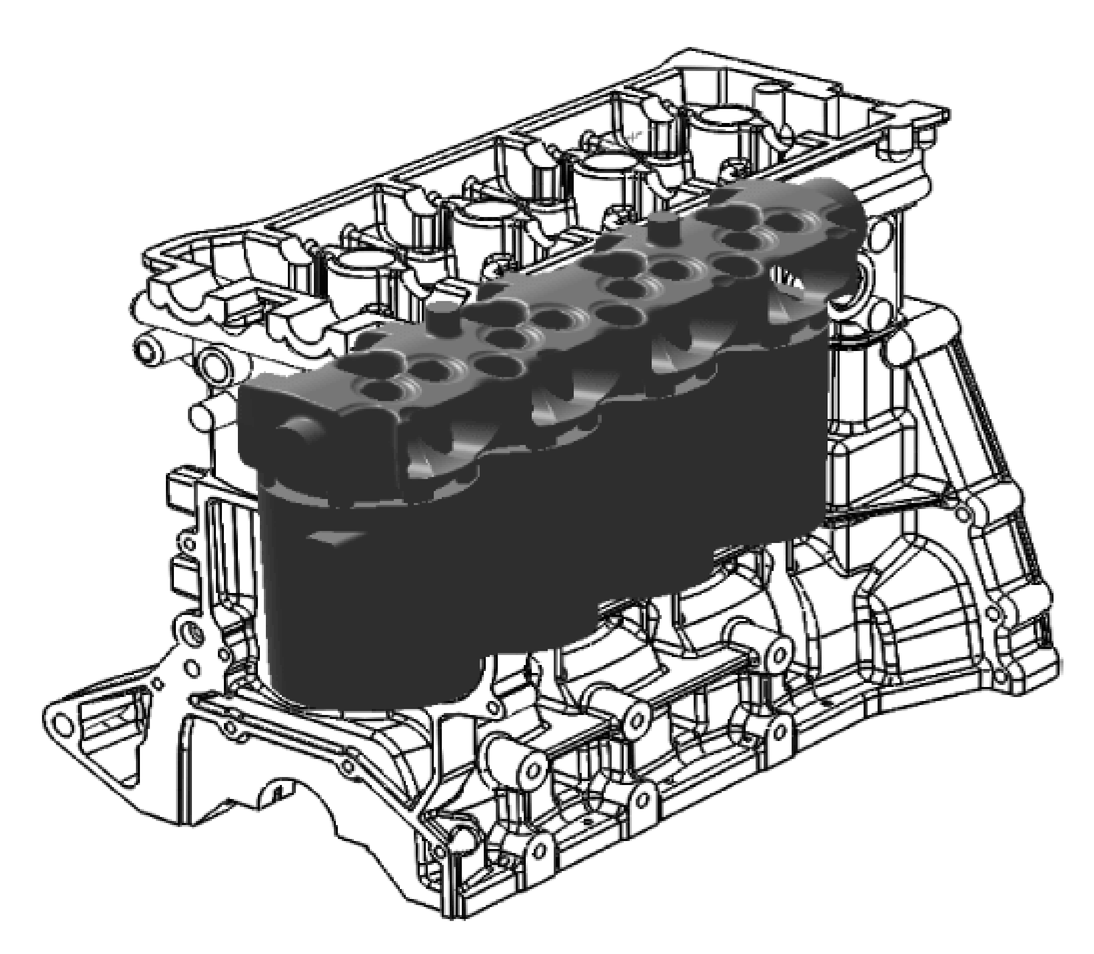


图 8-1 发动机水套

支持全自动网格划分和基于仿真结果的自适应网格划分。如图 8-2 所示，FloEFD 会根据阀门几何模型的不同和自动网格划分的等级自动创建网格。由此可以降低软件

使用者对于 CFD 专业知识背景的要求，提高仿真分析的效率。

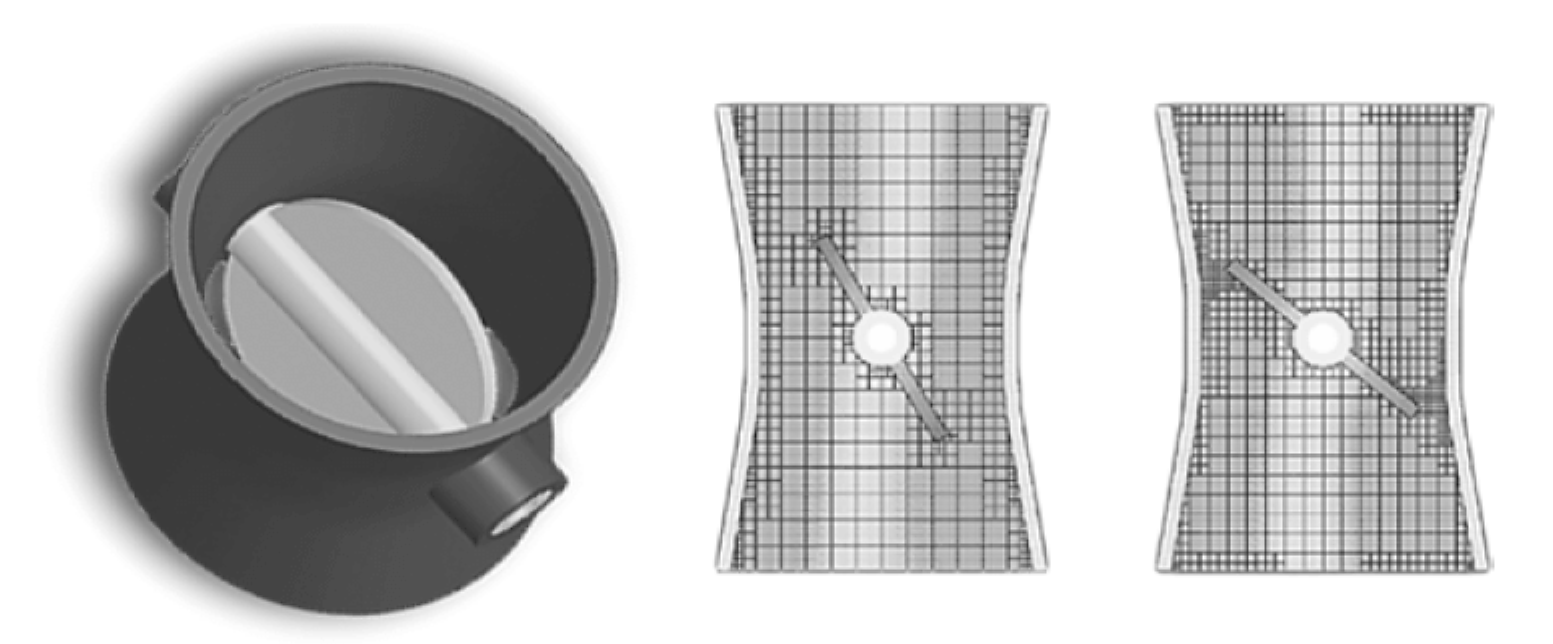


图 8-2　自动划分的阀门网格

层流、过渡流和湍流自动识别和求解能力。FloEFD 软件可以自动识别流体流动区域的流体流态，降低软件使用者对于 CFD 专业知识背景的要求，提高仿真分析的效率。如图 8-3 所示为 FloEFD 在整个流动范围内流体流动阻力系数仿真结果与实验数据的对比。

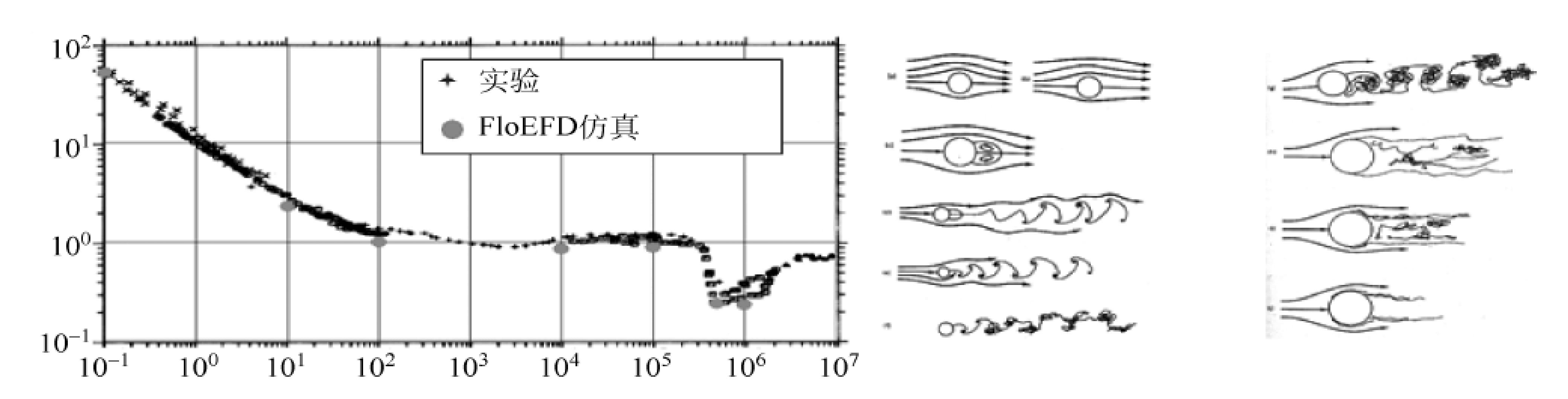


图 8-3　FloEFD 仿真结果与实验的流体流阻系数对比

FloEFD 中采用的修正壁面函数将网格和湍流模型联系在一起，可以在近壁面没有精细网格的条件下，获得足够的工程求解结果精度。图 8-4 所示为 FloEFD 中圆柱绕流仿真结果与实验的对比。

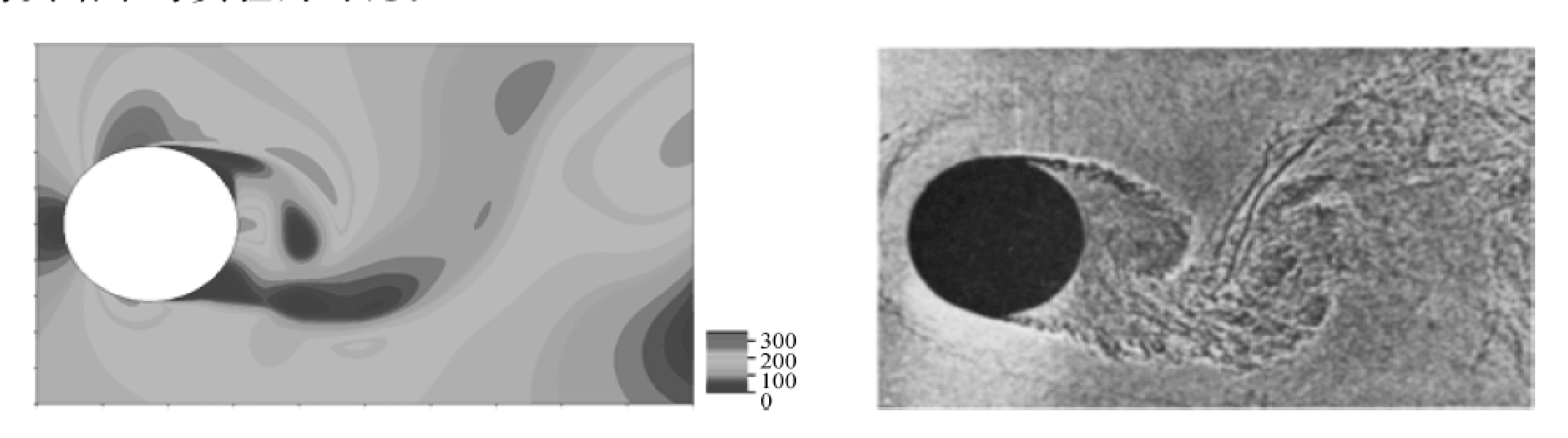


图 8-4　FloEFD 仿真结果与实验的圆柱绕流结果对比

自动求解收敛技术，与传统 CFD 软件通过残差曲线确定求解是否收敛不同，FloEFD 基于用户设置的目标进行收敛判定。由此，可以保证用户所关注区域和参数的准确性，

同时也保证了收敛的可靠性。图 8-5 所示为 FloEFD 软件的求解收敛监控窗口。

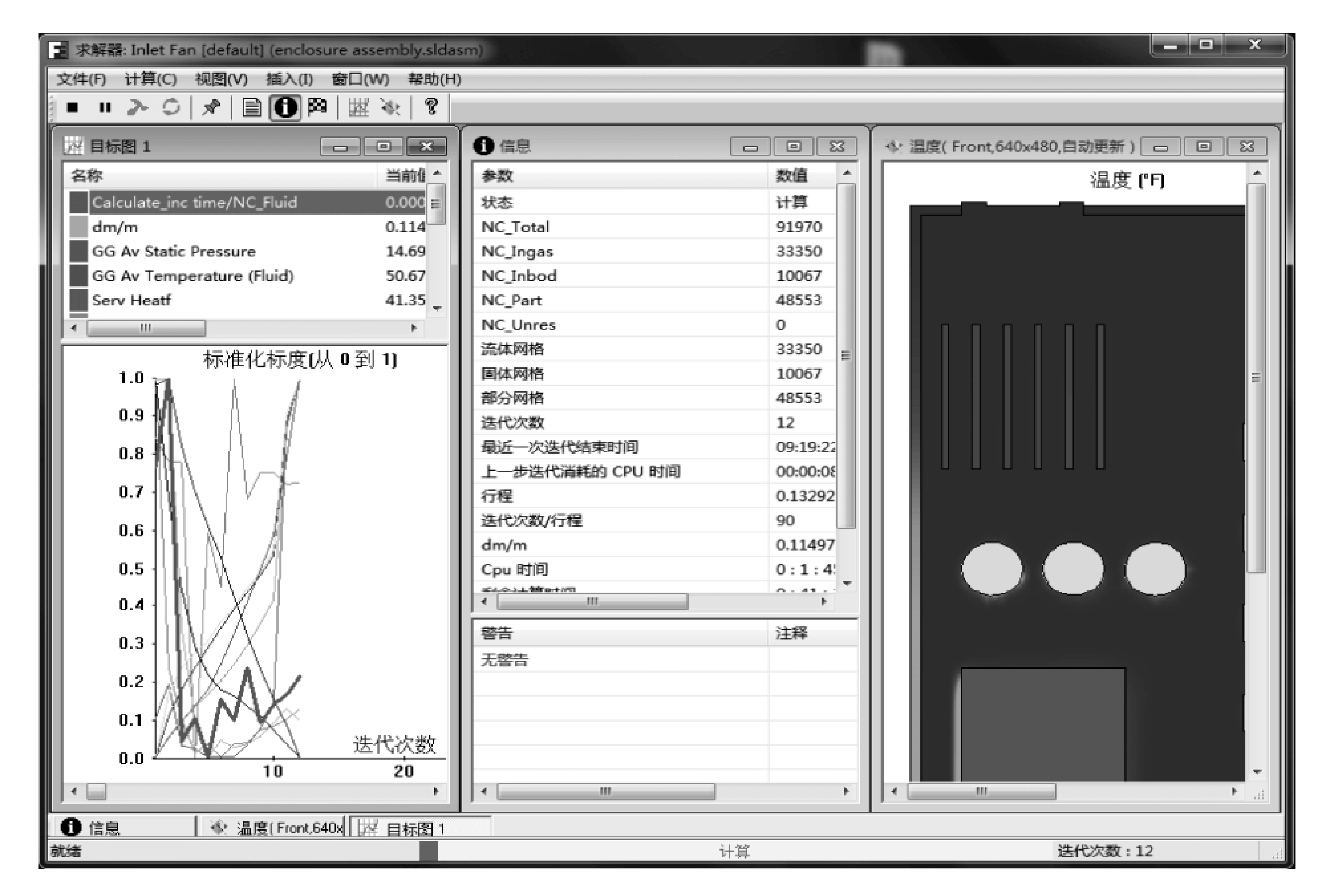


图 8-5　FloEFD 求解收敛监控窗口

通过 FloEFD 的参数化研究功能，可以快速地进行多方案对比和方案优化设计。其方案变量不仅仅可以是输入热功耗、材料、环境边界条件，还可以是模型零件的长度、角度等几何模型驱动参数。图 8-6 所示为 FloEFD 中采用参数化研究(parametric study)功能对散热器结构进行优化设计。

基于工程化的用户界面，FloEFD 的参数设置过程采用向导方式进行，不容易遗漏设置选项。如图 8-7 所示，求解完成之后的仿真结果可以被直接输出至 Excel 和 Word 等 Office 软件中，可以提高制作仿真报告的效率。

与传统的 CFD 软件相比，FloEFD 提高了企业产品研发的效率。如图 8-8 所示，如果采用传统的 CFD 软件进行产品流体流动和传热仿真分析，CAD 软件与 CFD 软件在产品各个阶段都有交互的过程。但采用 FloEFD 进行仿真分析，CAD 和 CFD 在同一环境中进行，没有模型数据的交互，整个产品设计研发过程被大幅缩短。

图 8-9 所示为采用传统 CFD 软件和 FloEFD 进行产品分析所占用时间的对比。与传统 CFD 软件相比，FloEFD 不需要模型导入和定义流体区域这两个环节，并且网格可以自动划分，所以，FloEFD 仿真分析一个产品所耗费的时间只有传统 CFD 软件的 25%～35%。

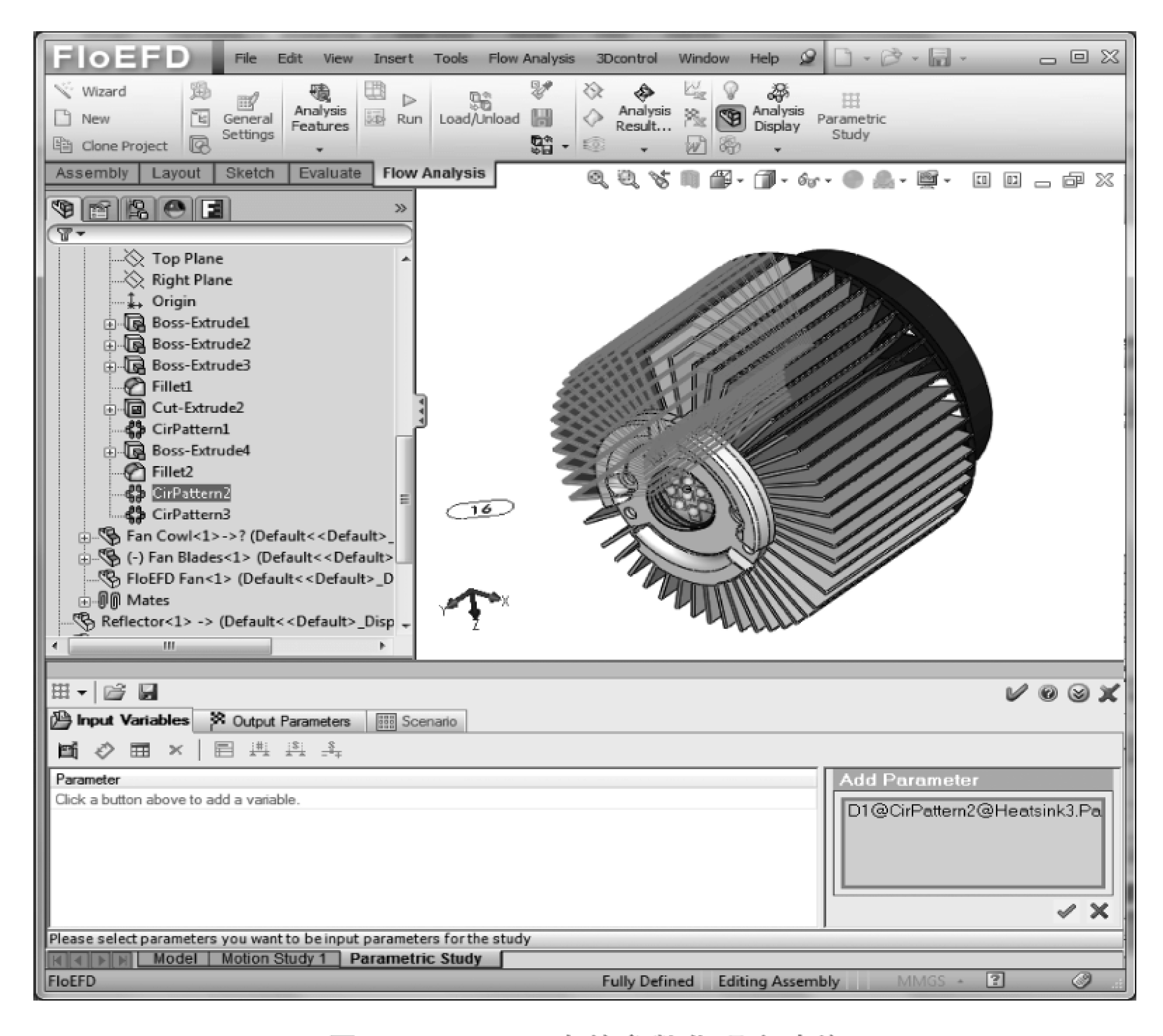


图 8-6　FloEFD 中的参数化研究功能

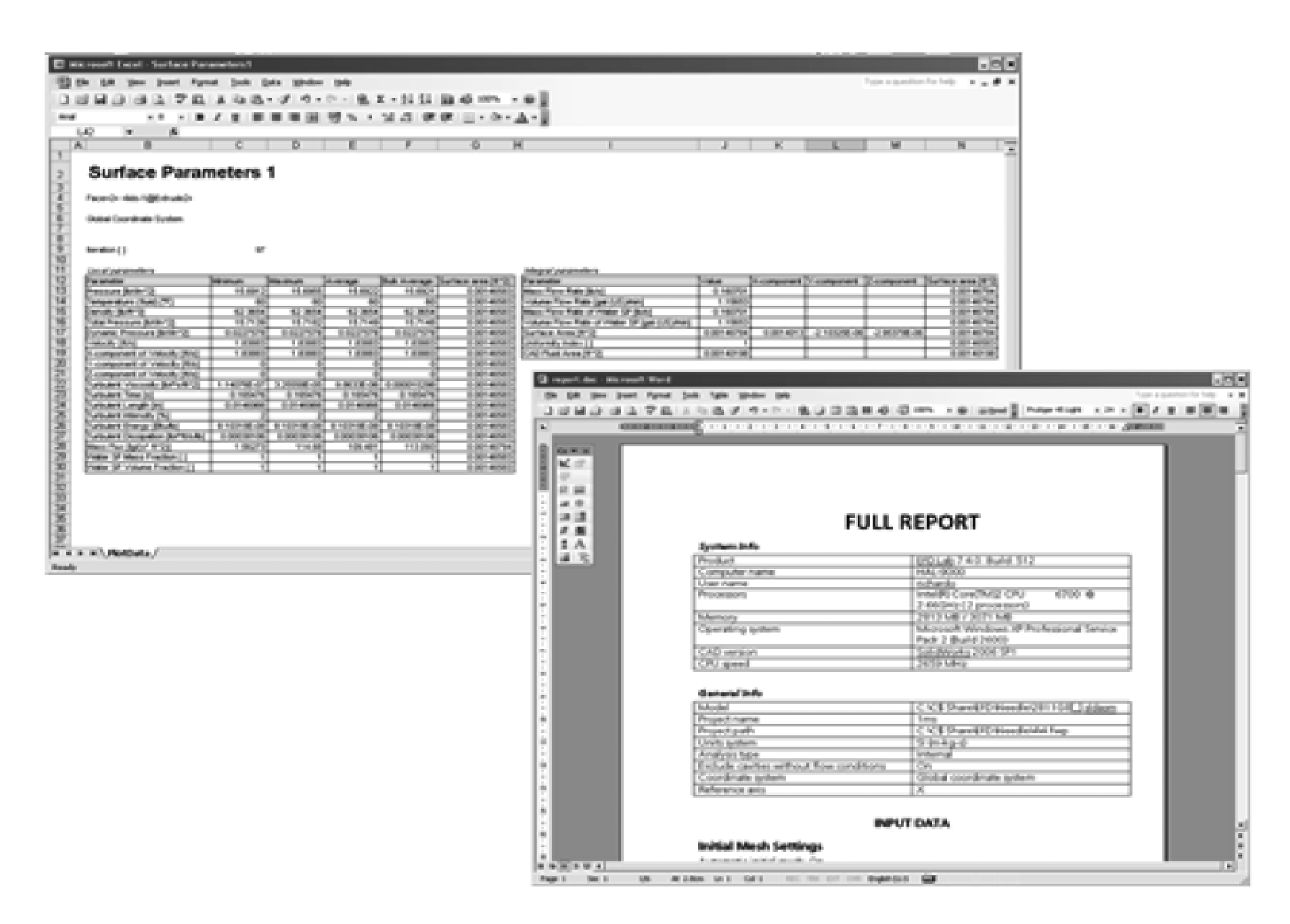


图 8-7　FloEFD 结果输出至 Excel 和 Word

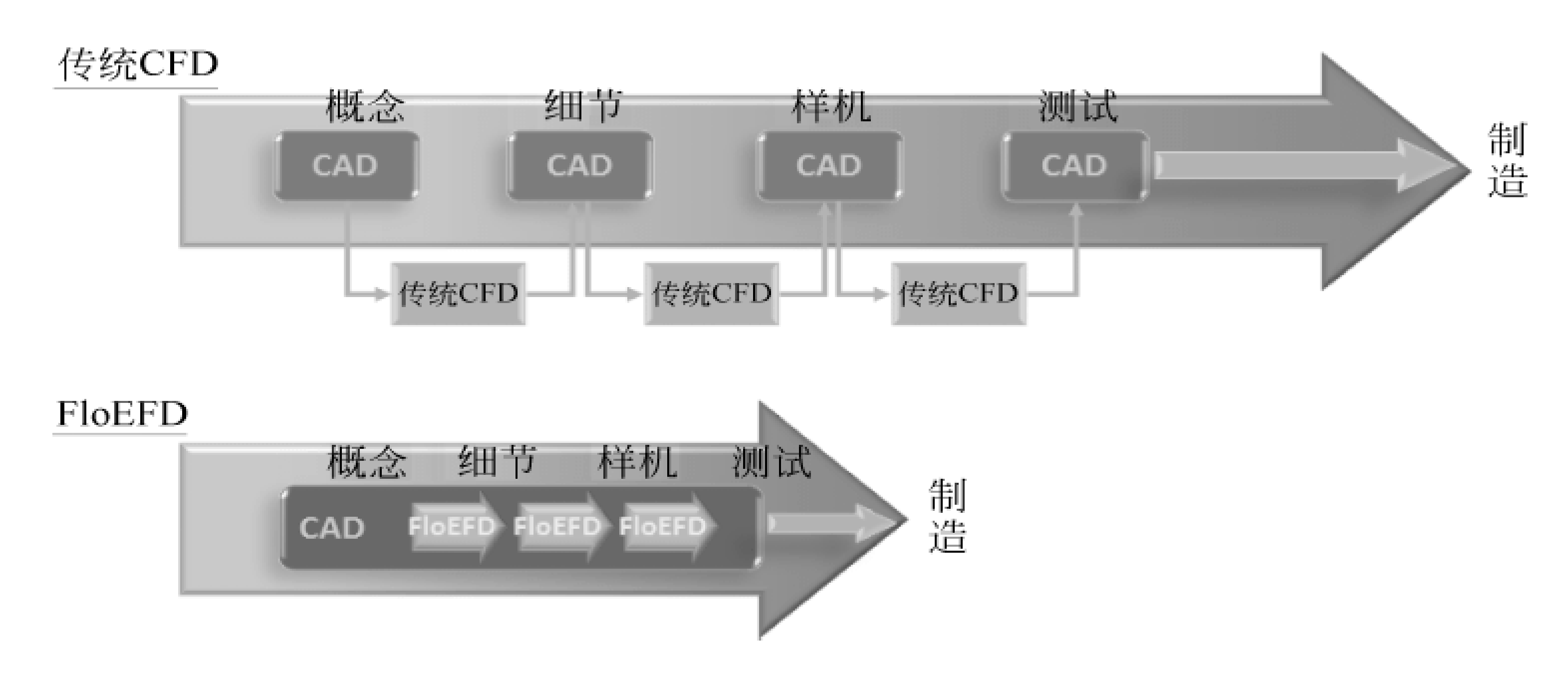


图 8-8 传统 CFD 软件与 FloEFD 软件在产品设计流程中的应用对比

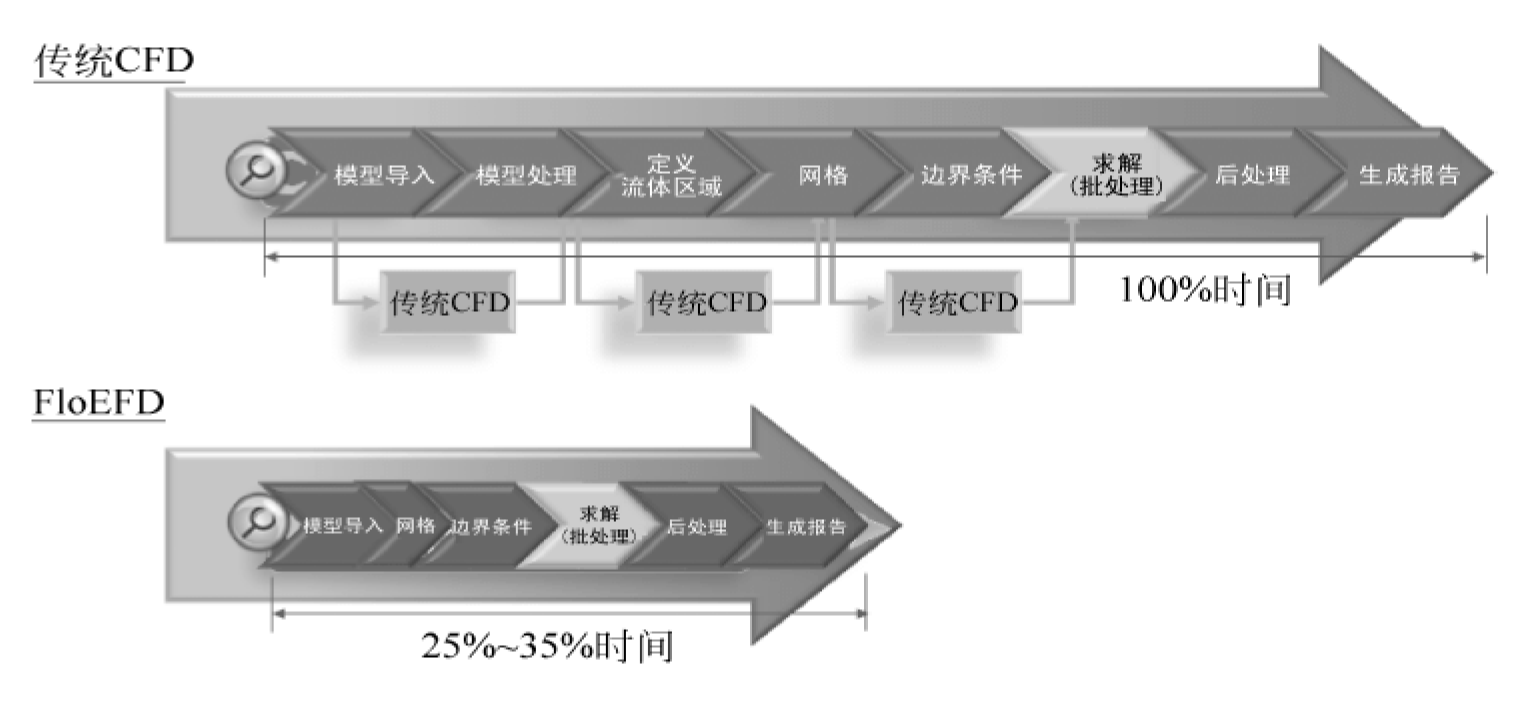


图 8-9 传统 CFD 软件与 FloEFD 软件进行产品仿真分析所占用时间的对比

8.3 FloEFD 工程应用背景

FloEFD 是无缝集成于主流三维 MCAD 软件中的高度工程化的通用流体流动与传热分析软件。它基于当今主流 CFD 软件都广泛采用的有限体积法（FVM）开发，并且被完全嵌入至 Creo、CATIA、Solidworks 和 NX 等主流三维 MCAD 软件中。主要应用于以下领域：

（1）照明行业；
（2）电子散热行业；
（3）汽车行业；
（4）军工、航天航空行业；
（5）机械行业；
（6）医疗器械行业；
（7）能源、化工行业；
（8）制冷、空调、暖通行业；
（9）风扇、泵、压缩机等透平机械行业；
（10）阀门、管道等流体控制设备行业。

FloEFD具有丰富的流体流动和传热学物理模型,可用于求解众多的工程实际问题:

(1) 外流、内流;

(2) 多流域(拥有独自流体参数);

(3) 不可压缩、可压缩粘性流动;

(4) 不可压缩、可压缩气体粘性流动包括亚音速、近音速、超音速、超高音速;

(5) 层流、湍流、过渡区流体流动;

(6) 多组分分析(甚至可达数十种不相关组分);

(7) 非牛顿流体流动;

(8) 涉及蒸汽的分析;

(9) 涉及相对湿度的分析;

(10) 空化现象;

(11) 耦合换热(流体与固体),导热与对流;

(12) 强迫对流、自然对流、混合对流;

(13) 太阳辐射和红外辐射分析(蒙特卡罗、离散坐标和离散传播模型);

(14) 瞬态问题;

(15) 旋转机械分析。

8.4 FloEFD软件安装

8.4.1 FloEFD 15.0软件程序安装

以下内容为FloEFD 15.0版本的安装指导。如图8-10所示,双击FloEFD 15.0版本程序安装文件夹中的Setup文件。

如图8-11所示,单击安装界面中的“安装64位的FloEFD”。

如图8-12所示,在弹出的FloEFD安装界面中,单击“下一步”按钮。

如图8-13所示,在弹出的FloEFD安装界面中,选择“我接受该许可证协议中的条款”,并且单击“下一步”。

如图8-14所示,在弹出的FloEFD安装界面中,设置“用户姓名”和“单位”信息。

如图8-15所示,在弹出的FloEFD安装界面中,直接单击“下一步”按钮。此处可以暂时不设置许可证的位置。

如图8-16所示,在弹出的FloEFD安装界面中,选择FloEFD的安装路径,注意安装路径中不要包含中文字符。并且单击“下一步”按钮。

如图8-17所示,在弹出的FloEFD安装界面中,选择“完整安装”,并且单击“下一步”按钮。

如图8-18所示,在弹出的FloEFD安装界面中,单击“安装”。

如图8-19所示为FloEFD程序安装界面。

如图8-20所示,在弹出的FloEFD安装界面中,单击“完成”按钮。完成FloEFD软件的安装。

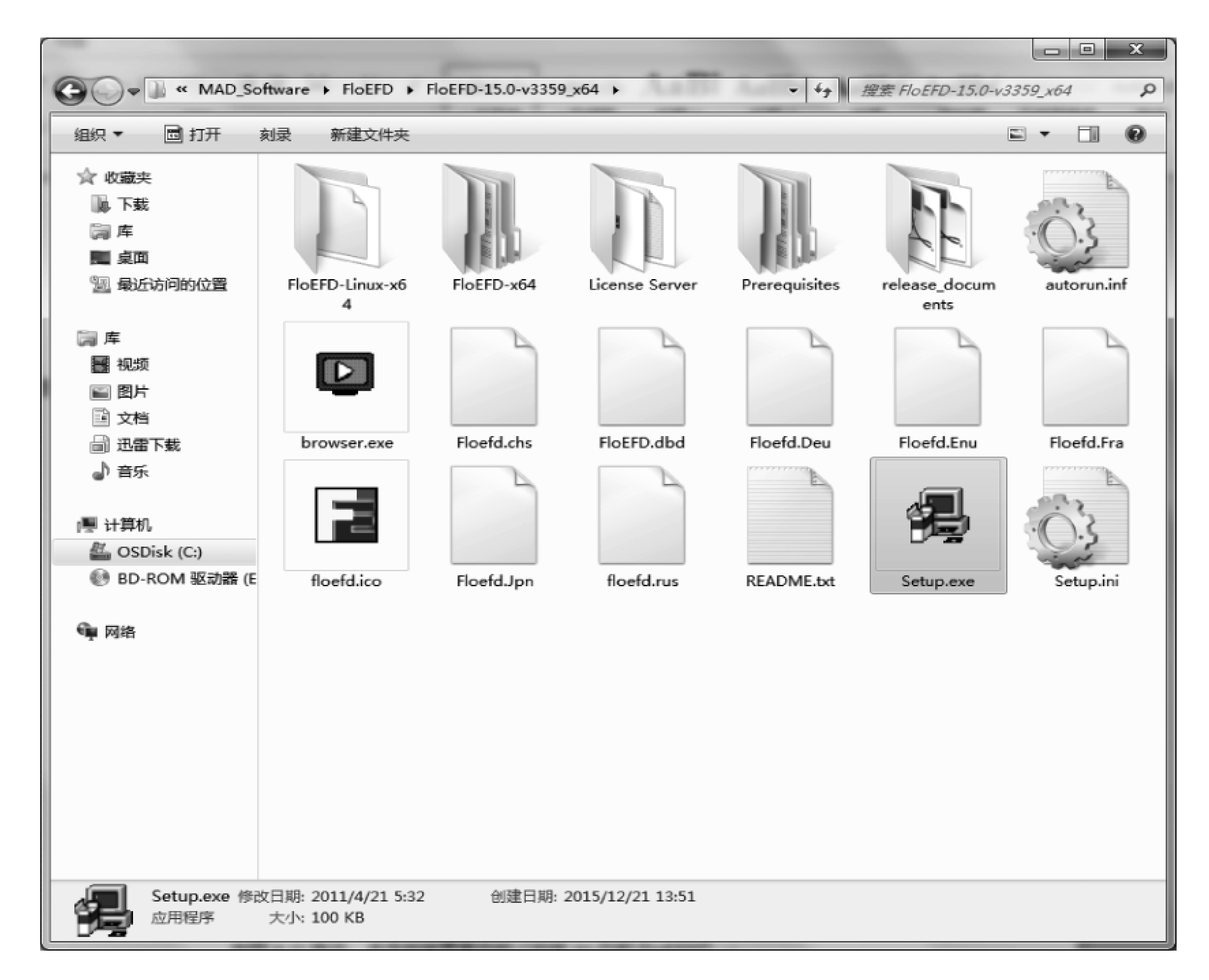


图 8-10 FloEFD 15.0 版本程序安装文件夹

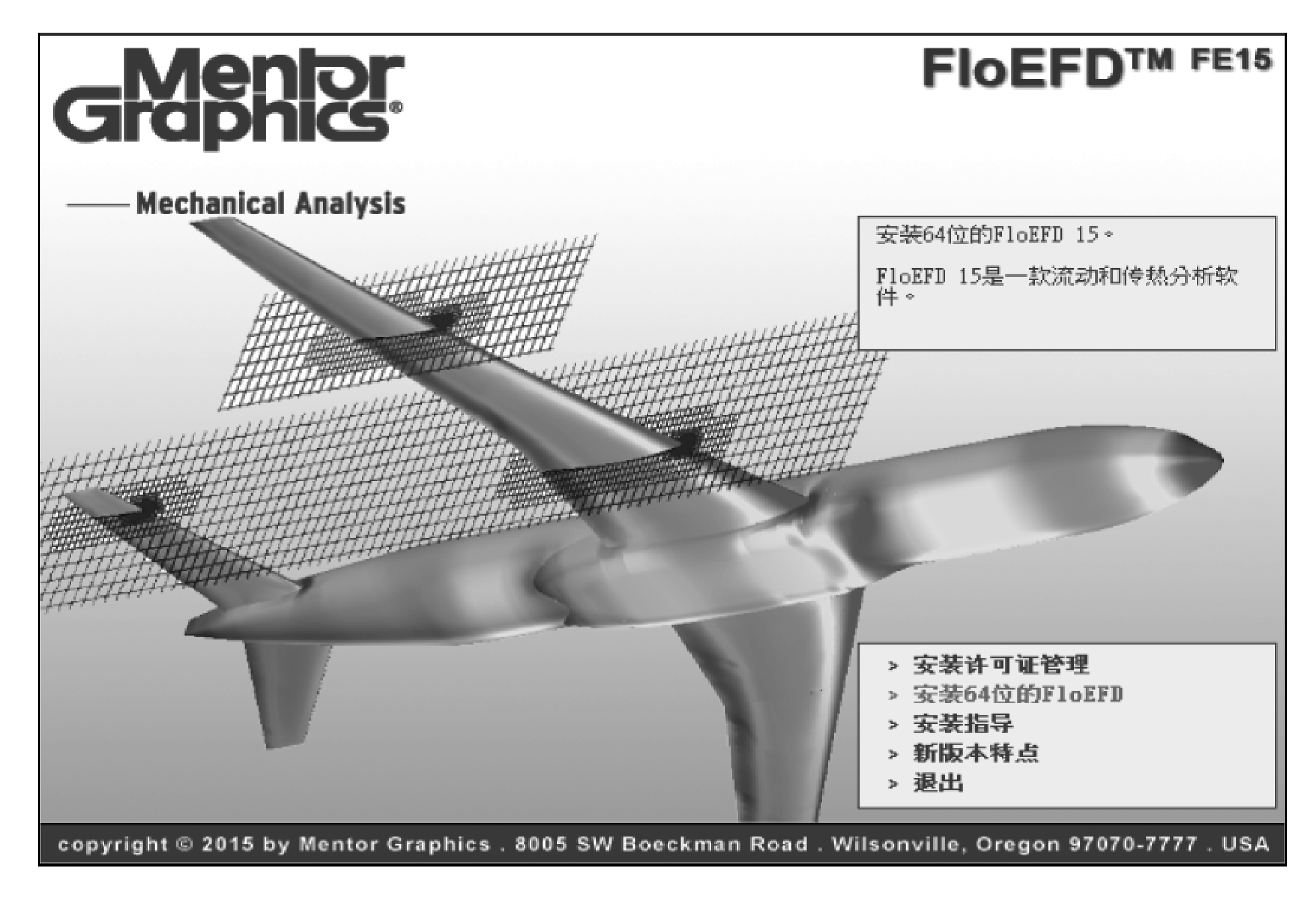


图 8-11 FloEFD 安装界面 1



图 8-12 FloEFD 安装界面 2



图 8-13 FloEFD 安装界面 3



图 8-14 FloEFD 安装界面 4



图 8-15　FloEFD 安装界面 5



图 8-16　FloEFD 安装界面 6



图 8-17　FloEFD 安装界面 7



图 8-18　FloEFD 安装界面 8



图 8-19　FloEFD 安装界面 9



图 8-20　FloEFD 安装界面 10

8.4.2 许可证管理器的安装

如图 8-21 所示，单击安装界面中的“安装许可证管理”。

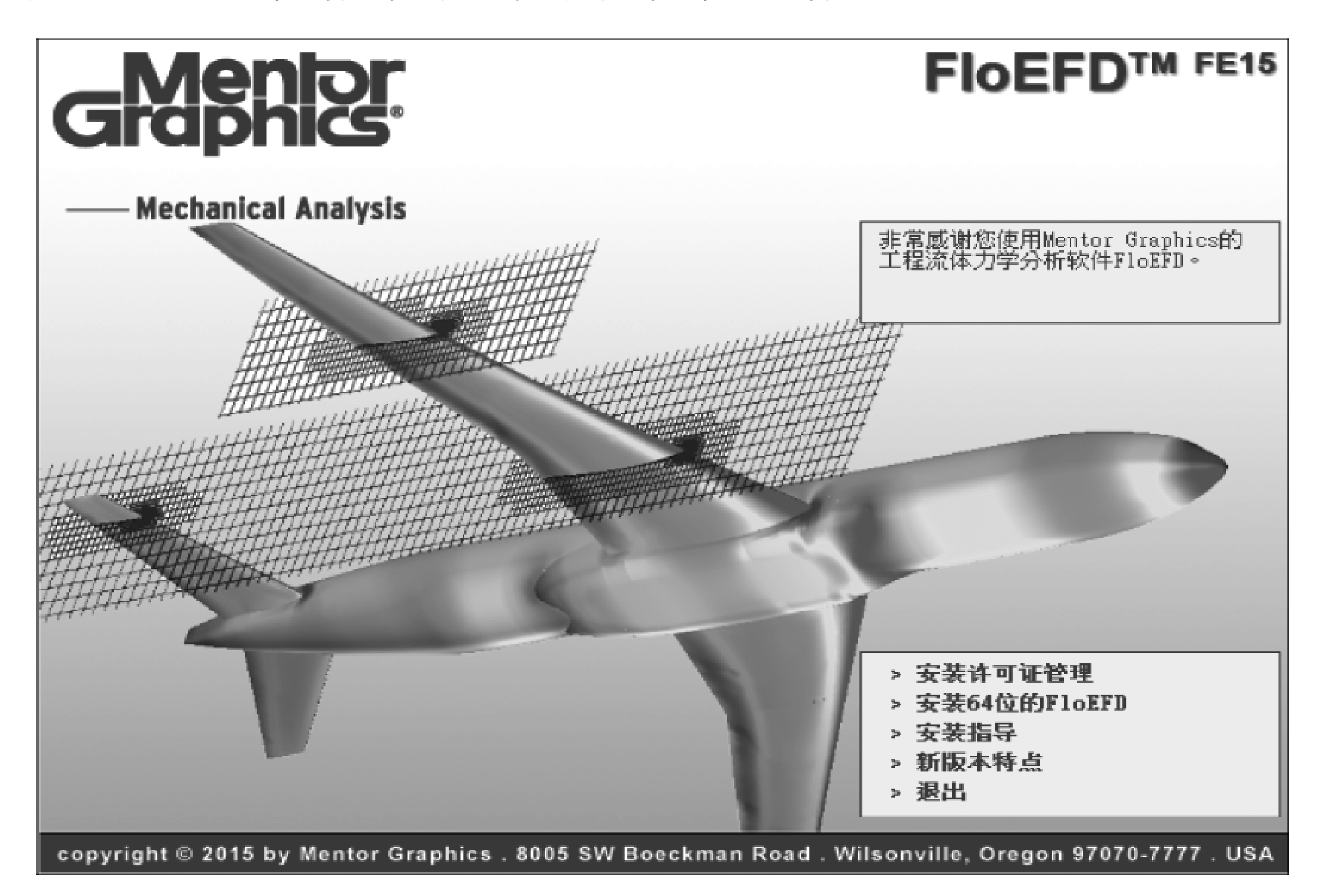


图 8-21 安装界面 11

如图 8-22 所示，在弹出的许可证管理器安装界面中，单击 Next 按钮。



图 8-22 许可证管理器安装界面 1

图 8-23 所示安装界面中，选择 I accept the terms in the license agreement，并且单击 Next 按钮。



图 8-23　许可证管理器安装界面 2

如图 8-24 所示，在弹出的许可证管理器安装界面中，选择许可证管理器的安装路径，并且单击 Next 按钮。

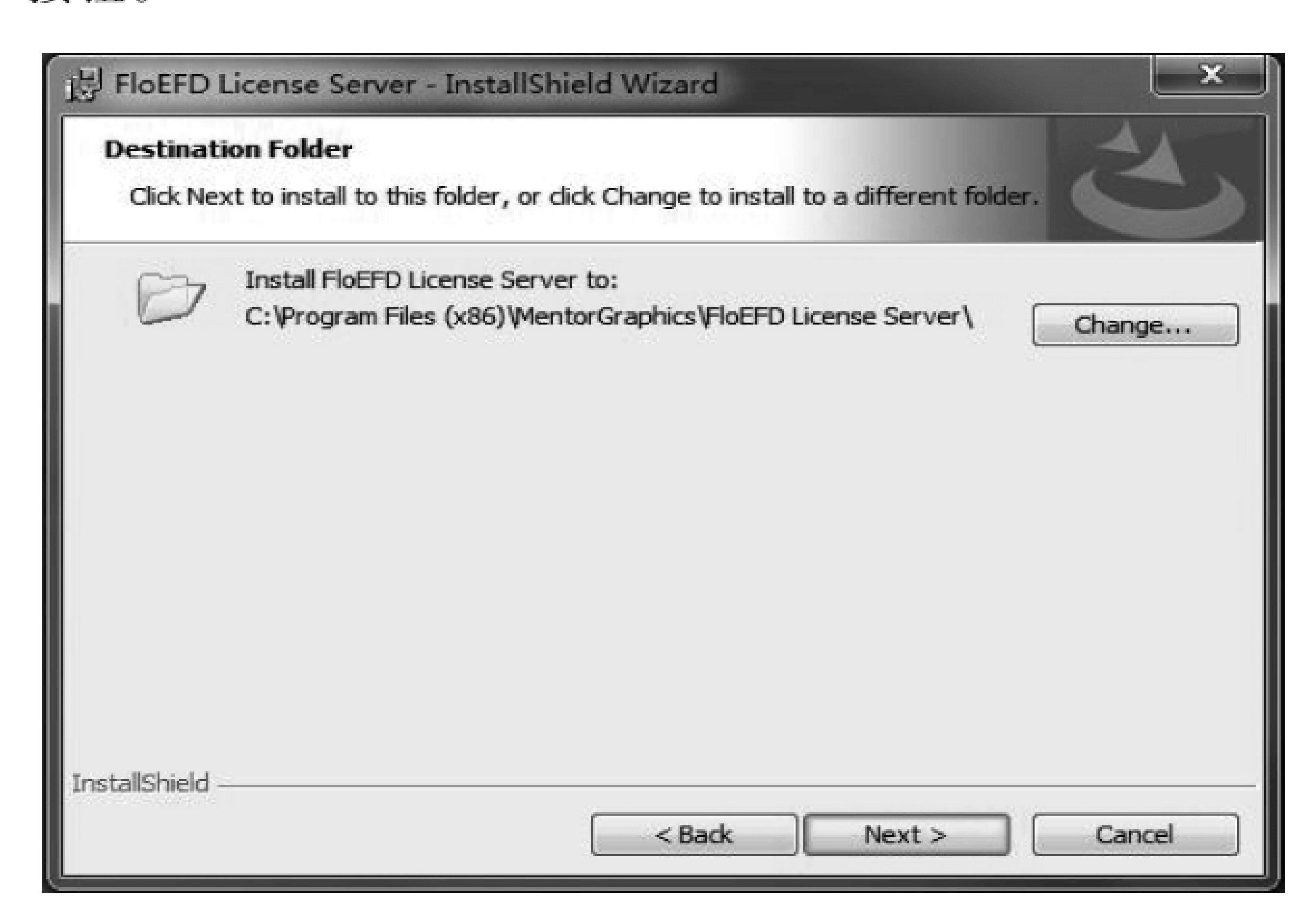


图 8-24　许可证管理器安装界面 3

如图 8-25 所示，在弹出的许可证管理器安装界面中，可以不做任何修改，单击 Next 按钮。

如图 8-26 所示，在弹出的许可证管理器安装界面中，单击 Install 按钮。

如图 8-27 所示，在弹出的许可证管理器安装界面中，单击 Finish 按钮。

如图 8-28 所示，单击安装界面中的“退出”按钮。完成许可证管理器的安装。

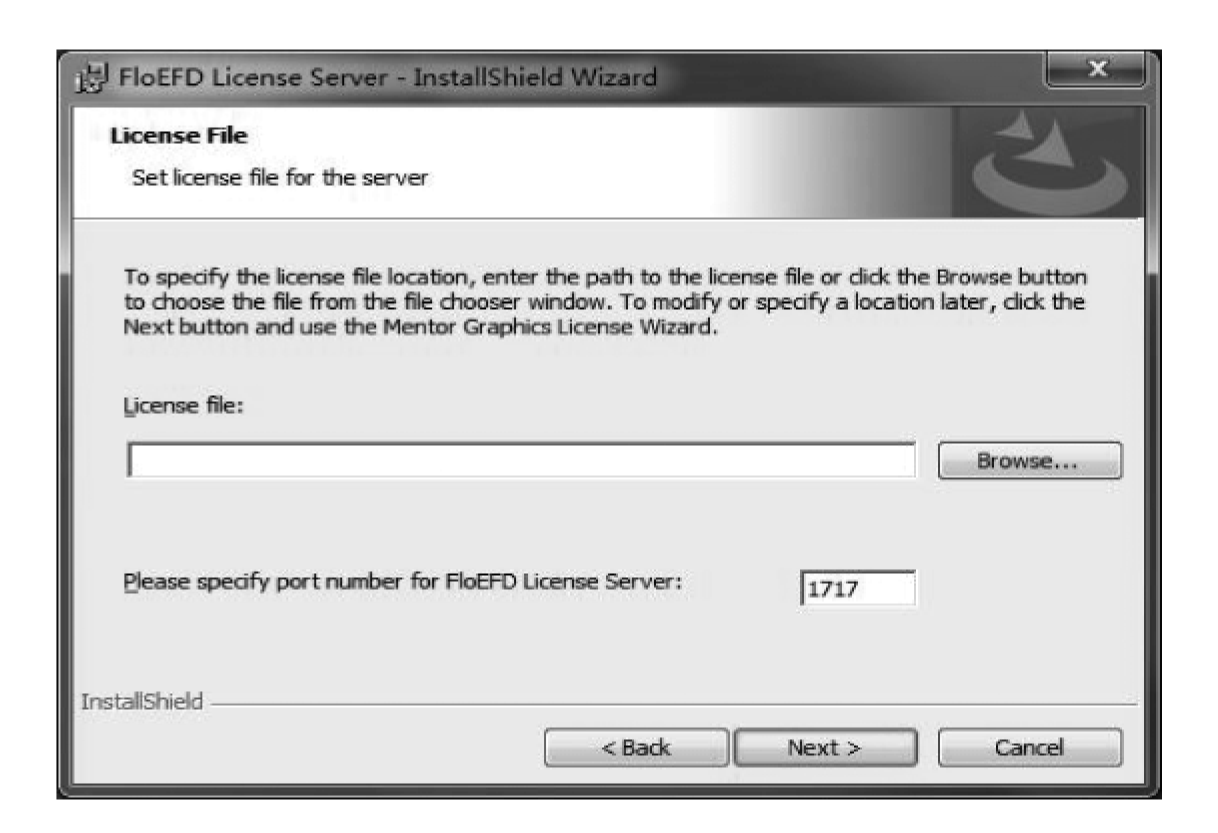


图 8-25　许可证管理器安装界面 4

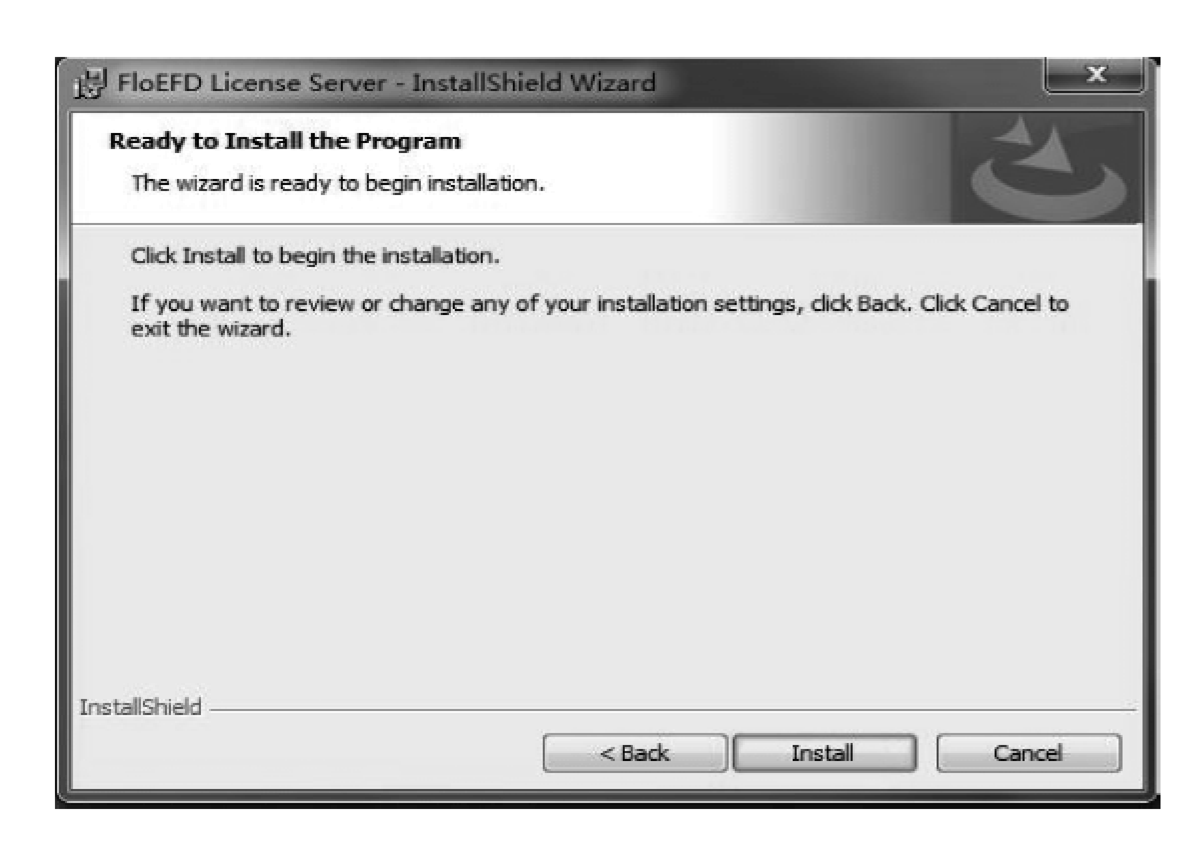


图 8-26　许可证管理器安装界面 5

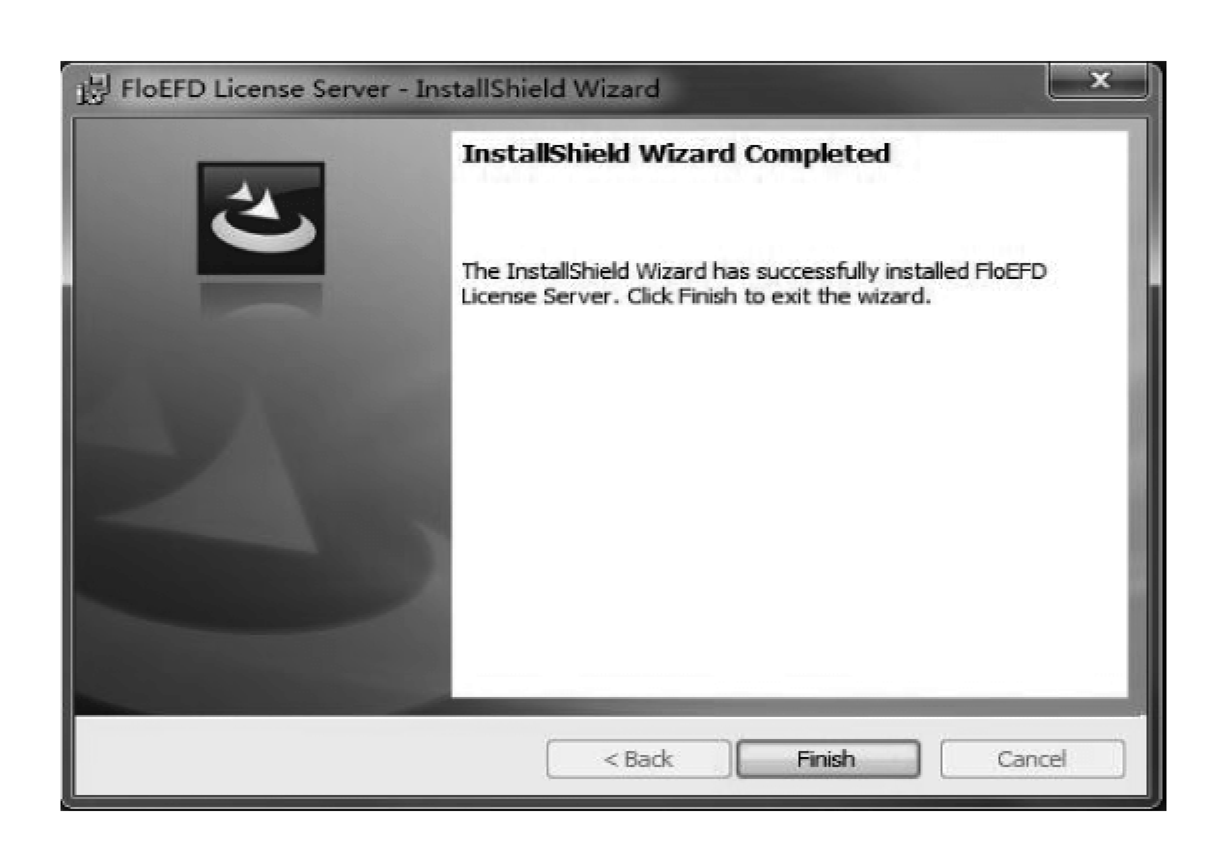


图 8-27　许可证管理器安装界面 6

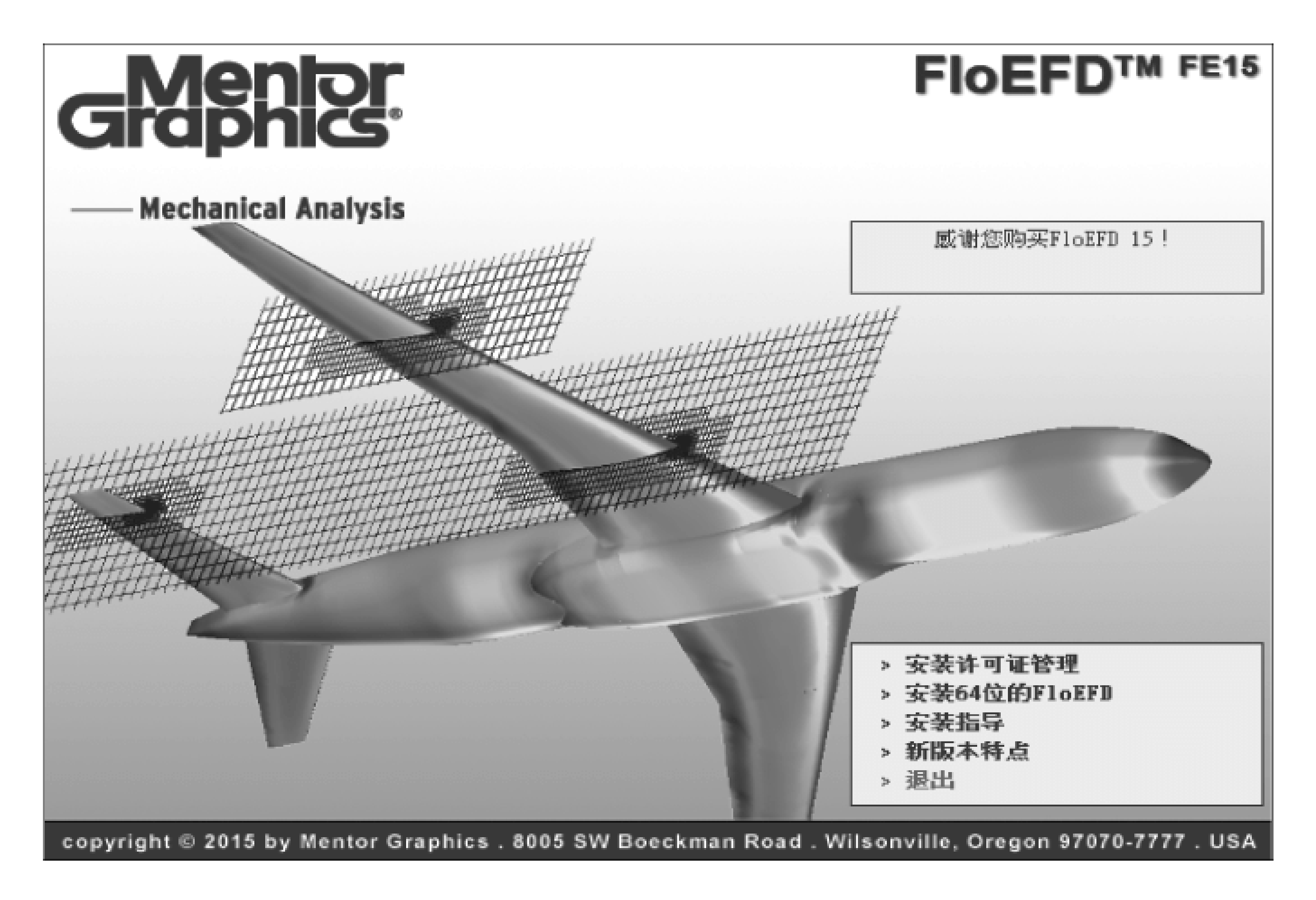
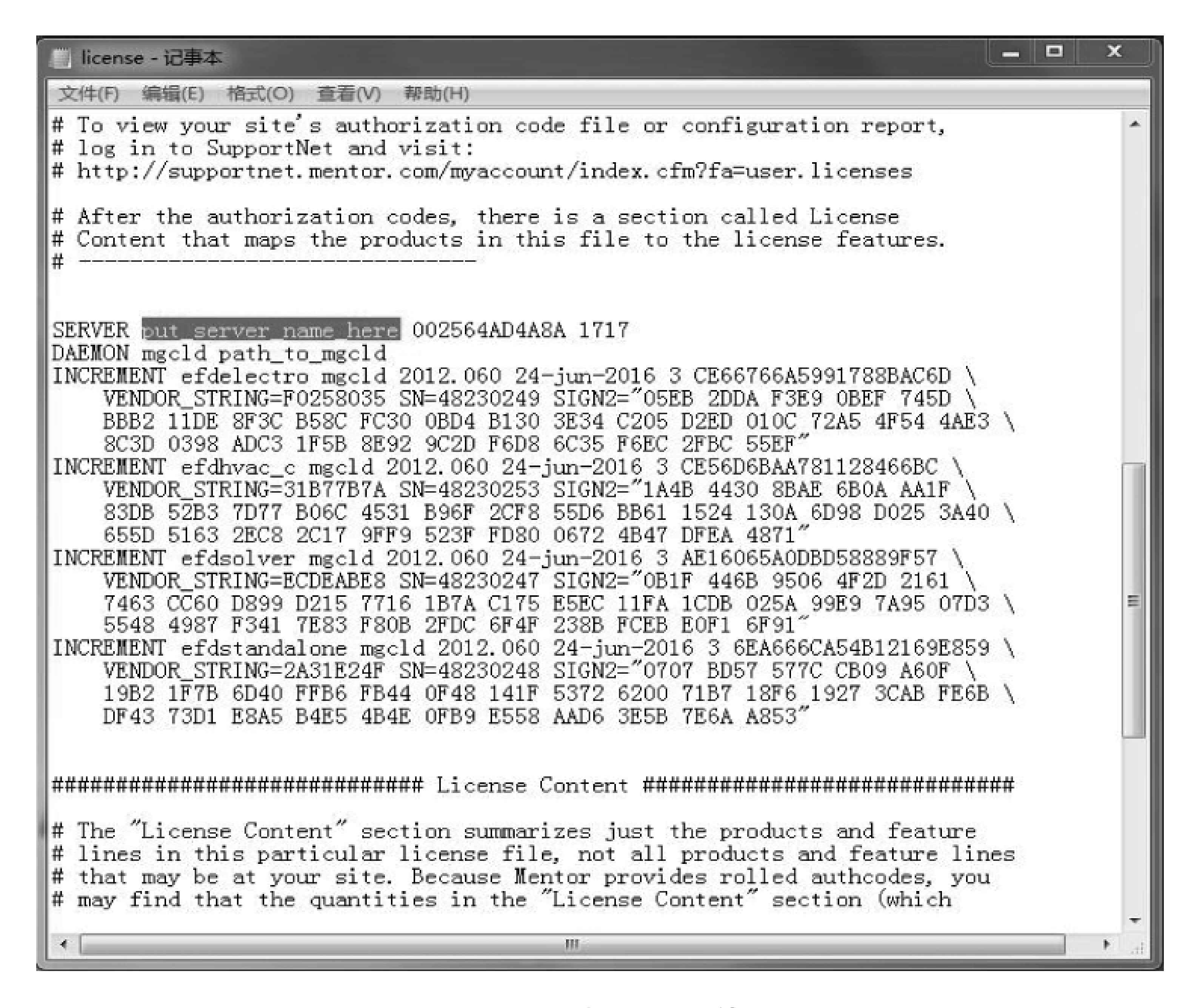


图 8-28　安装界面 12

8.4.3　FloEFD 15.0 单机版或网络浮动版服务器许可证的安装

以文本形式打开许可证文件，如图 8-29 所示，用 FloEFD 软件安装计算机名替代许可证文件中的 put_server_name_here。



license - 记事本

文件(F)　编辑(E)　格式(O)　查看(V)　帮助(H)

```
# To view your site's authorization code file or configuration report,
# log in to SupportNet and visit:
# http://supportnet.mentor.com/myaccount/index.cfm?fa=user.licenses

# After the authorization codes, there is a section called License
# Content that maps the products in this file to the license features.
# -------------------------------


SERVER put_server_name_here 002564AD4A8A 1717
DAEMON mgcld path_to_mgcld
INCREMENT efdelectro mgcld 2012.060 24-jun-2016 3 CE66766A5991788BAC6D \
    VENDOR_STRING=F0258035 SN=48230249 SIGN2="05EB 2DDA F3E9 0BEF 745D \
    BBB2 11DE 8F3C B58C FC30 0BD4 B130 3E34 C205 D2ED 010C 72A5 4F54 4AE3 \
    8C3D 0398 ADC3 1F5B 8E92 9C2D F6D8 6C35 F6EC 2FBC 55EF"
INCREMENT efdhvac_c mgcld 2012.060 24-jun-2016 3 CE56D6BAA781128466BC \
    VENDOR_STRING=31B77B7A SN=48230253 SIGN2="1A4B 4430 8BAE 6B0A AA1F \
    83DB 52B3 7D77 B06C 4531 B96F 2CF8 55D6 BB61 1524 130A 6D98 D025 3A40 \
    655D 5163 2EC8 2C17 9FF9 523F FD80 0672 4B47 DFEA 4871"
INCREMENT efdsolver mgcld 2012.060 24-jun-2016 3 AE16065A0DBD58889F57 \
    VENDOR_STRING=ECDEABE8 SN=48230247 SIGN2="0B1F 446B 9506 4F2D 2161 \
    7463 CC60 D899 D215 7716 1B7A C175 E5EC 11FA 1CDB 025A 99E9 7A95 07D3 \
    5548 4987 F341 7E83 F80B 2FDC 6F4F 238B FCEB E0F1 6F91"
INCREMENT efdstandalone mgcld 2012.060 24-jun-2016 3 6EA666CA54B12169E859 \
    VENDOR_STRING=2A31E24F SN=48230248 SIGN2="0707 BD57 577C CB09 A60F \
    19B2 1F7B 6D40 FFB6 FB44 0F48 141F 5372 6200 71B7 18F6 1927 3CAB FE6B \
    DF43 73D1 E8A5 B4E5 4B4E 0FB9 E558 AAD6 3E5B 7E6A A853"


############################## License Content ##############################

# The "License Content" section summarizes just the products and feature
# lines in this particular license file, not all products and feature lines
# that may be at your site. Because Mentor provides rolled authcodes, you
# may find that the quantities in the "License Content" section (which
```

图 8-29　许可证文件 1

如图 8-30 所示，将 MGCLD 文件所在路径替换许可证文件中的 path_to_mgcld，并且对路径加引号。默认路径为 C:\Program Files (x86)\MentorGraphics\FloEFD License Server\Bin。

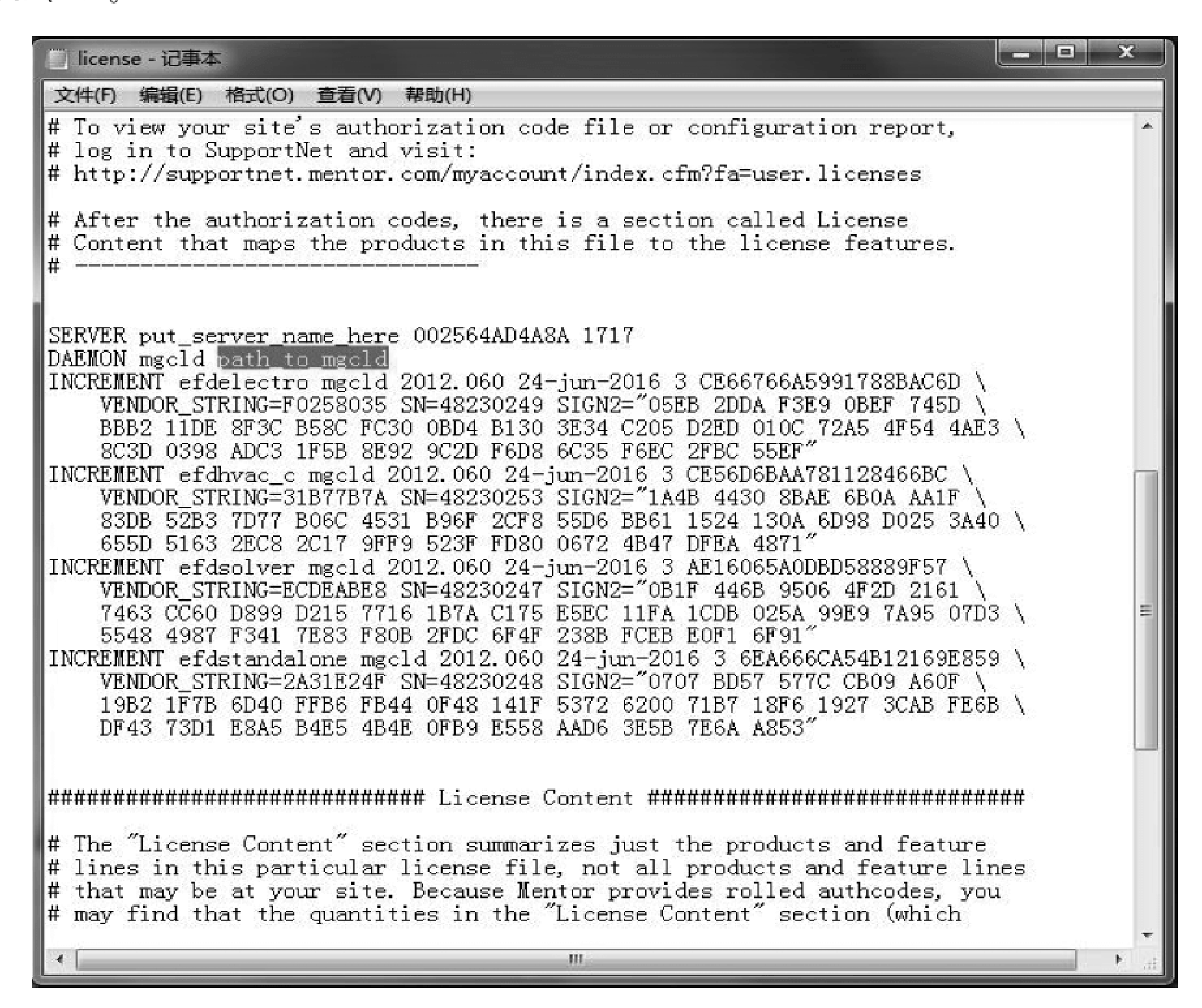


图 8-30 许可证文件 2

如图 8-31 所示为修改之后的许可证文件示例。

如图 8-32 所示，单击“开始”→“所有程序”→Mentor Graphics→FloEFD License Server→License Wizard 命令。

如图 8-33 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击“下一步”按钮。

如图 8-34 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击“下一步”按钮。

如图 8-35 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击 Browse 按钮，如图 8-36 所示，找到之前修改的许可证文件，并且单击“打开”按钮。

如图 8-37 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击“下一步”。

如图 8-38 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击 Install and start license service 按钮。

如图 8-39 所示，在弹出的 License Wizard 界面中，单击“完成”按钮。完成单机版或网络浮动版服务器许可证的安装。

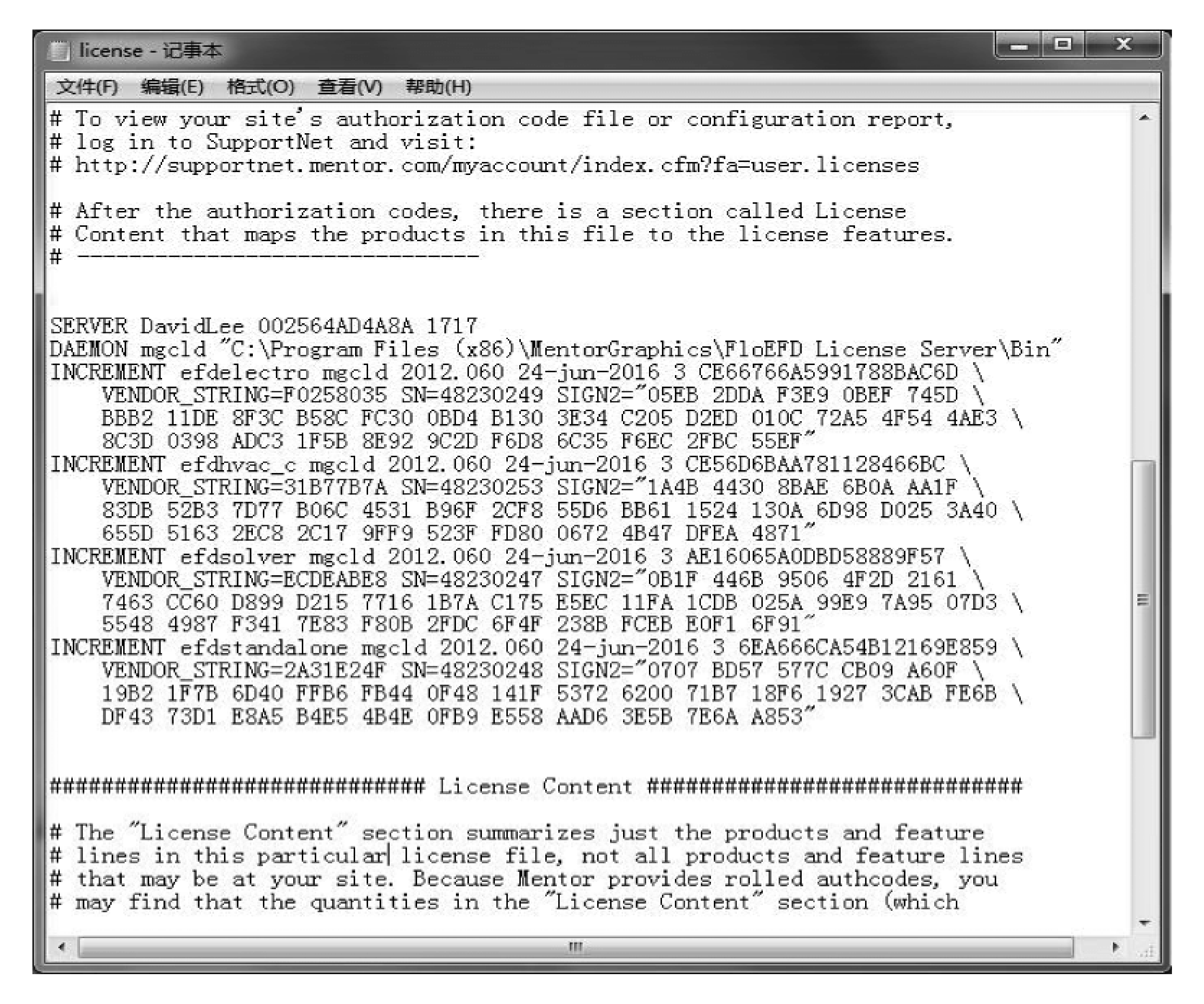


图 8-31　修改之后的许可证文件



图 8-32　License Wizard

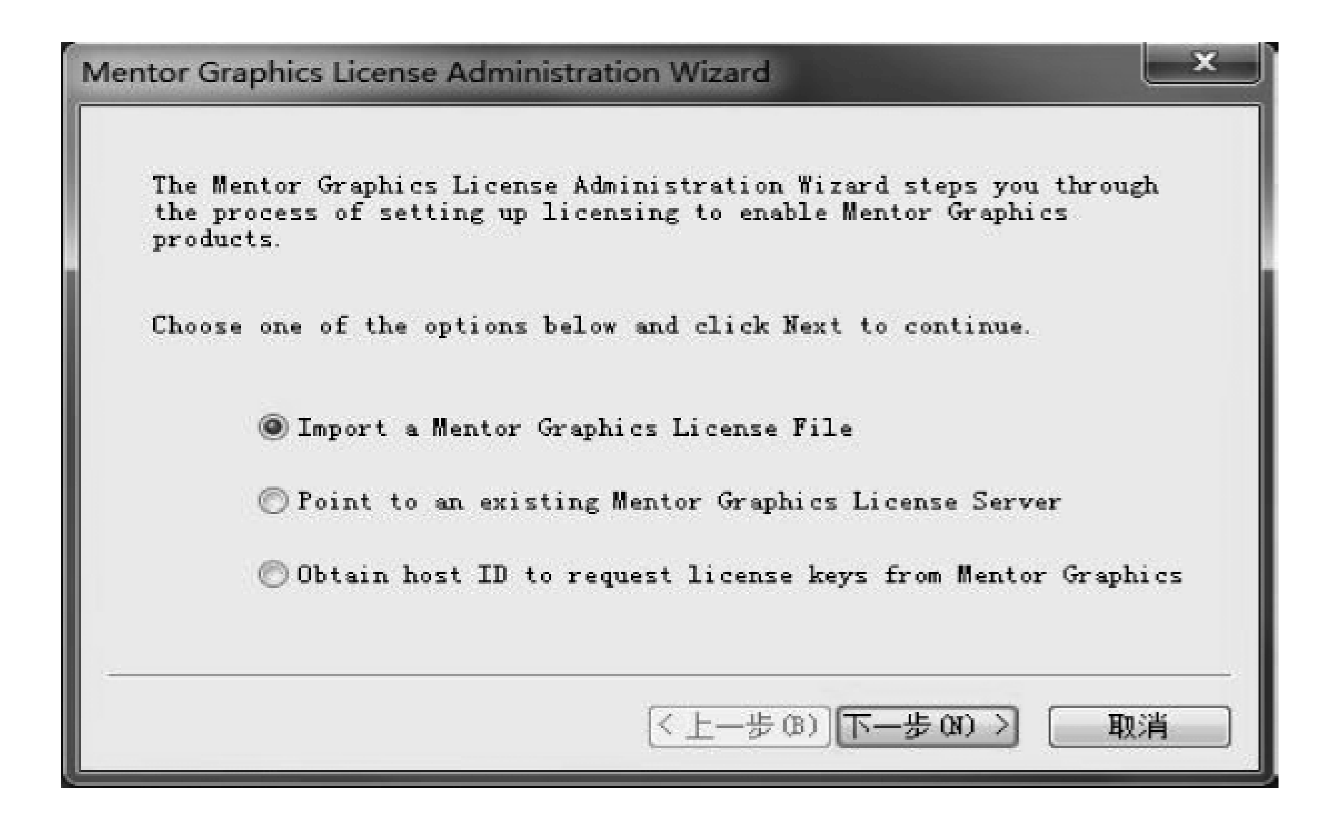


图 8-33　License Wizard 界面 1

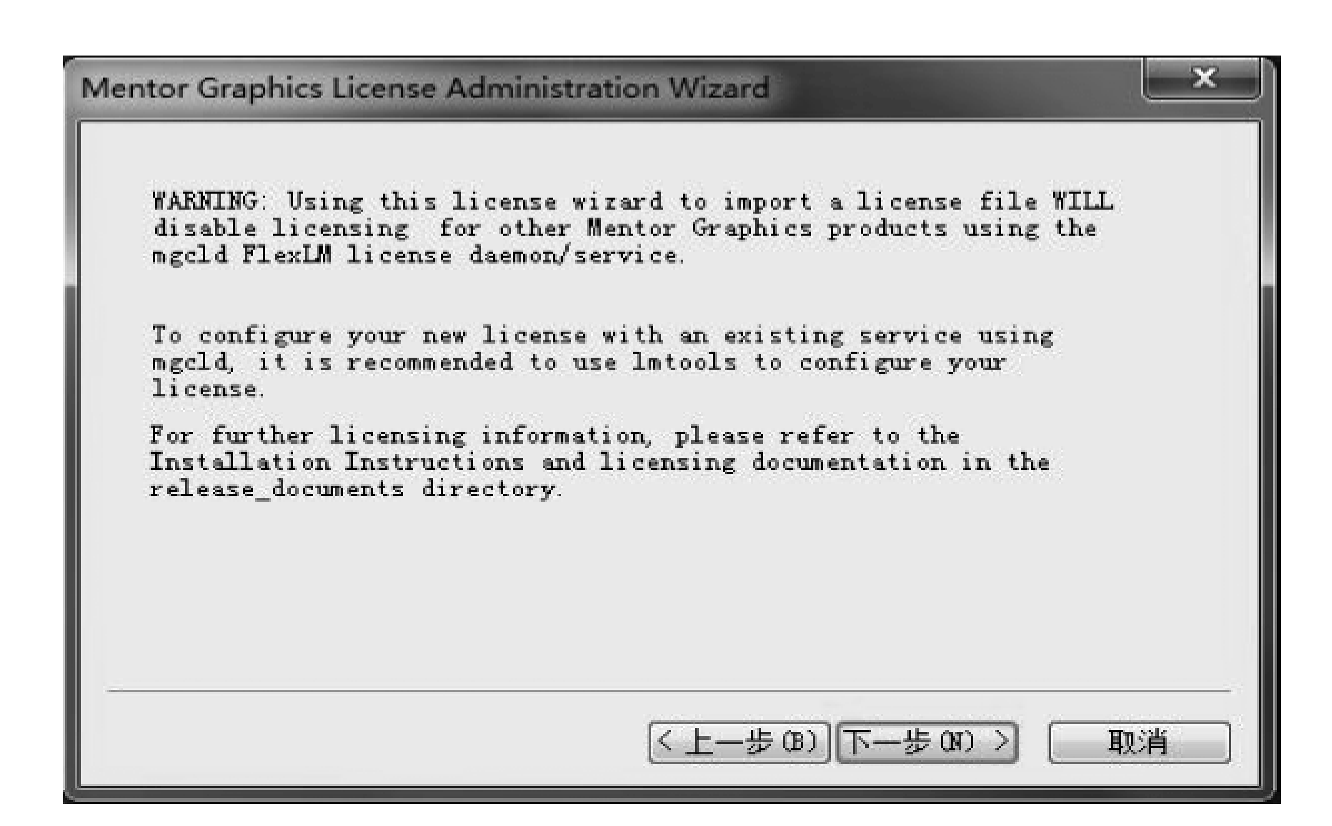


图 8-34　License Wizard 界面 2

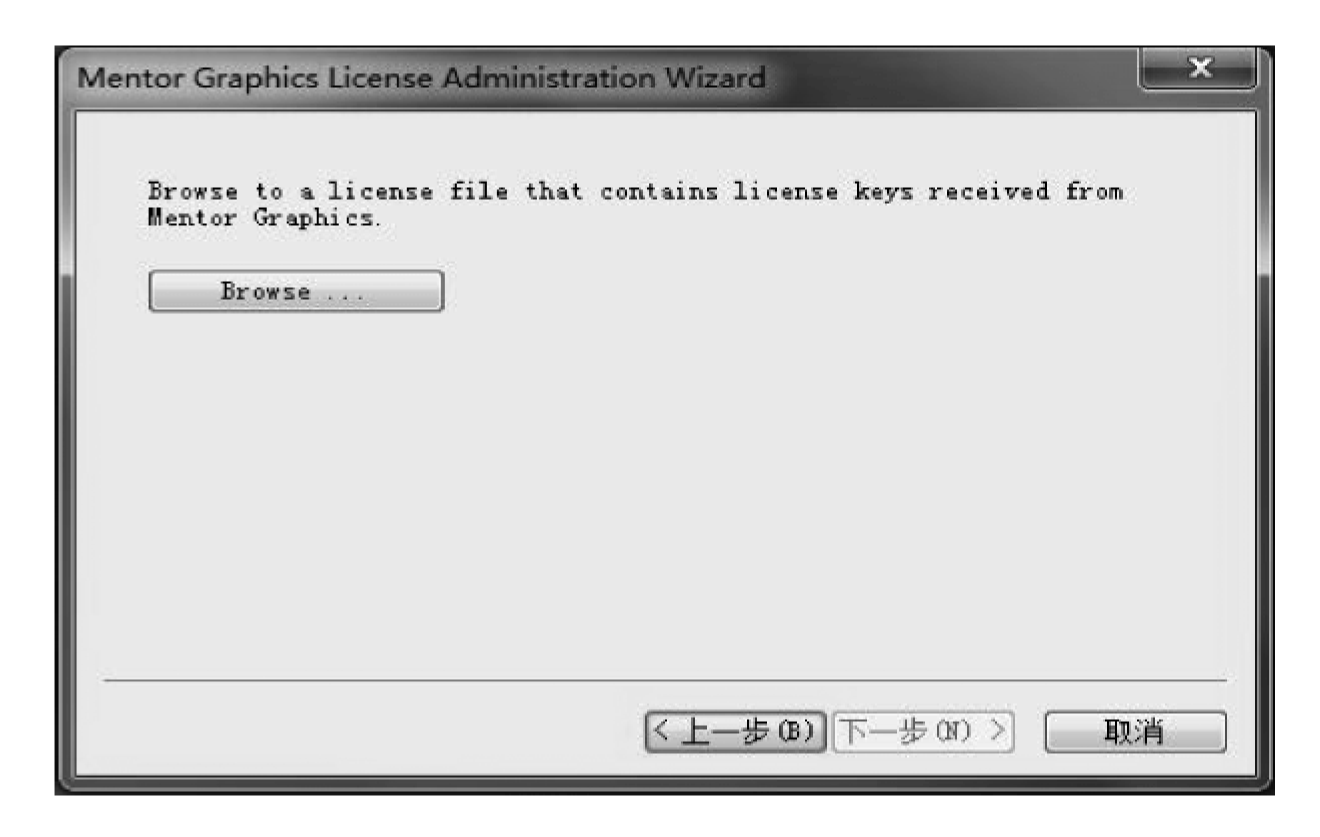


图 8-35　License Wizard 界面 3



图 8-36 打开许可证文件

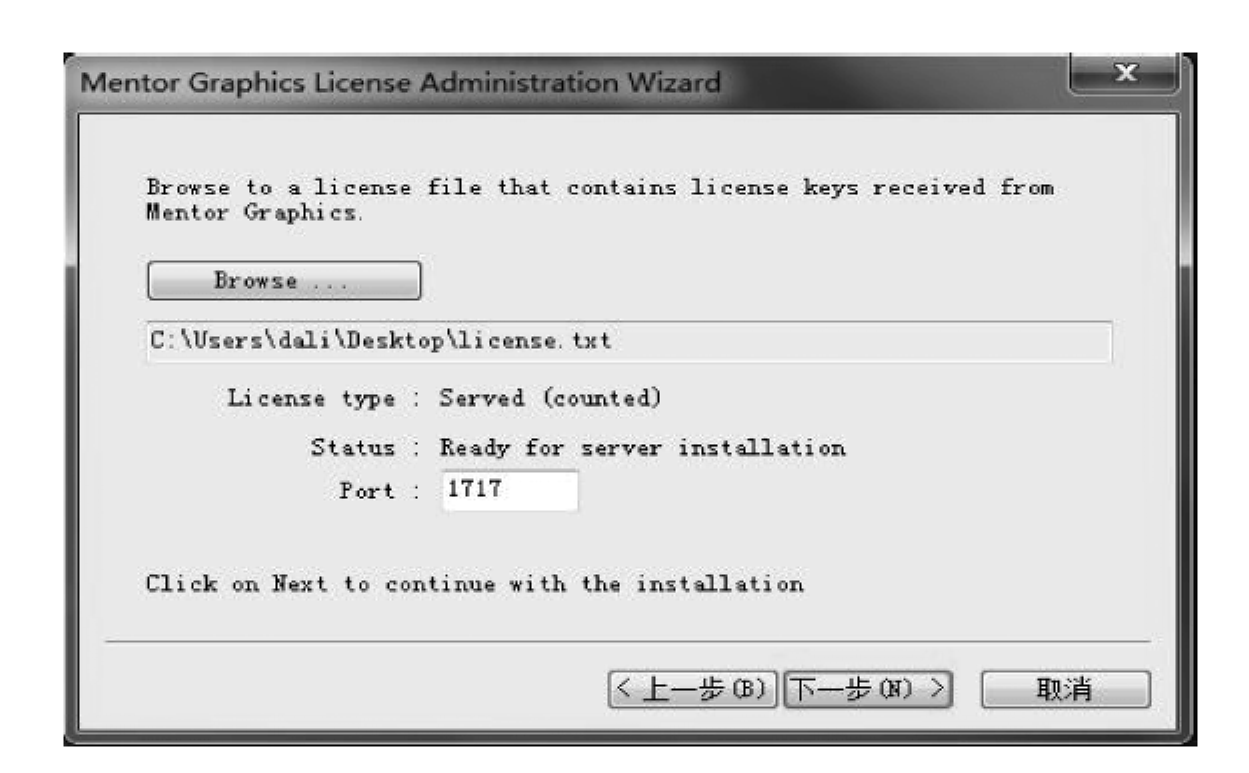


图 8-37 License Wizard 界面 4



图 8-38 License Wizard 界面 5

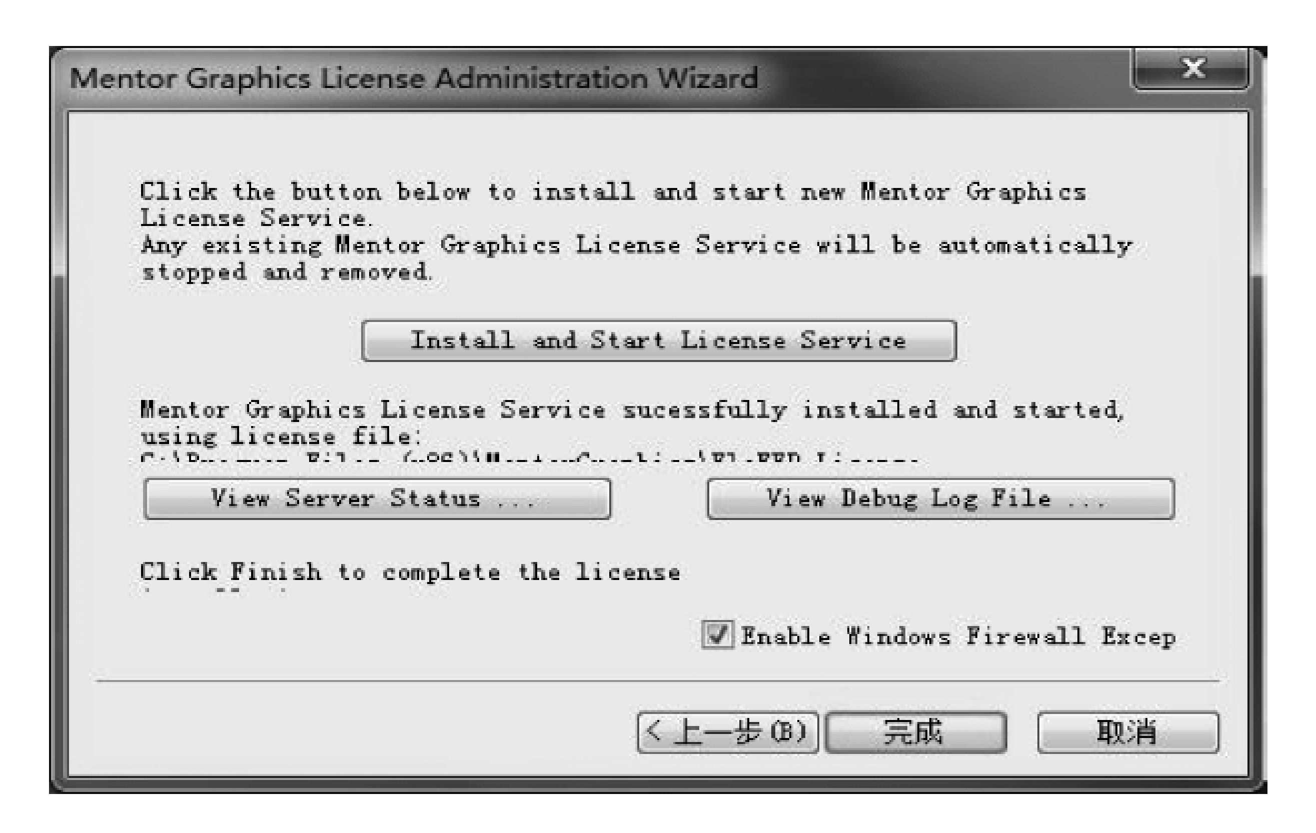


图 8-39　License Wizard 界面 6

8.4.4　FloEFD 15.0 网络浮动版客户端许可证获取

在网络浮动版客户端所在计算机桌面上右击“我的电脑”，选择“属性”，打开“系统属性”对话框，如图 8-40 所示，在“高级”选项卡中单击“环境变量”按钮，打开“环境变量”对话框。单击系统变量中的“新建”按钮，新建一个系统变量。其中变量名为 MGLS_LICENSE_FILE，变量值 1717@< Host_Name >，其中< Host_Name >为网络浮动版服务器所在计算机的名称。



图 8-40　环境变量设置

单击各个窗口中的“确定”，获取网络浮动版客户端的许可证。

8.5 热仿真软件使用流程

图 8-41 所示为热仿真软件使用流程，在建立模型阶段需要在热仿真软件中构建所需要分析项目的几何形体以及设置相应的参数和边界条件；网格划分过程可以由软件自动完成或者手动完成；通常求解计算的时长取决于仿真项目的规模和计算机硬件的配置；结果分析阶段需要对仿真结果进行细致分析，了解项目中温度、速度和压力等物理量场的分布和形成的原因；如果项目仿真结果不符合设计要求，还需要进一步调整项目方案设计，并且再次进行仿真分析工作。

图 8-41 热仿真软件使用流程

8.6 FloEFD 软件 LED 模块

8.6.1 介绍

FloEFD 软件的 LED 模块能方便和精确地进行 LED 产品的热仿真分析。LED 模块使 FloEFD 在仿真功能、简化模型和数据库数据三个方面有所增强。通过 LED 模块，FloEFD 可以进行半透明材料对于入射电磁波进行选择性吸收等物理现象的仿真分析，并且增加了 LED 和 PCB 简化模型。此外，在工程数据库中加入了风扇、LED、辐射光谱和材料等数据。

8.6.2 仿真功能

1. 蒙特卡罗辐射模型

蒙特卡罗射线跟踪法是一种统计分析方法。采用这种分析方法，在一个特定环境中特定辐射表面的宏观行为可以通过辐射表面（或吸收介质）微观级别的行为统计模型得到。因此，可以从辐射表面或吸收介质发出射线，之后记录这些射线运行的轨迹。此方法可以模拟介质随入射电磁波波谱变化的吸收过程。射线数目越多，求解结果越精确。

2. 离散坐标辐射模型

离散坐标法的思想为假定在空间一确定的立体角内辐射强度均匀，然后将立体角划分为若干离散的角度，将每一个离散的角度方向的辐射传递方程均转化为一个偏微分方程进行求解，然后不同离散方向的辐射强度再通过源项耦合在一起。此方法可以用于求

解半透明介质随入射波谱变化的吸收特性。其求解的准确性与离散角度的数量有关。此辐射模型适用于没有集中辐射源和低温的场合(电子设备散热)。

3. LED 特性

如图 8-42 所示,如果 LED 器件通过 LED 简化模型的 RC 热阻模型进行建模,则不仅仅可以得到 LED 的结点温度,还可以获取 LED 的热功耗和光通量。

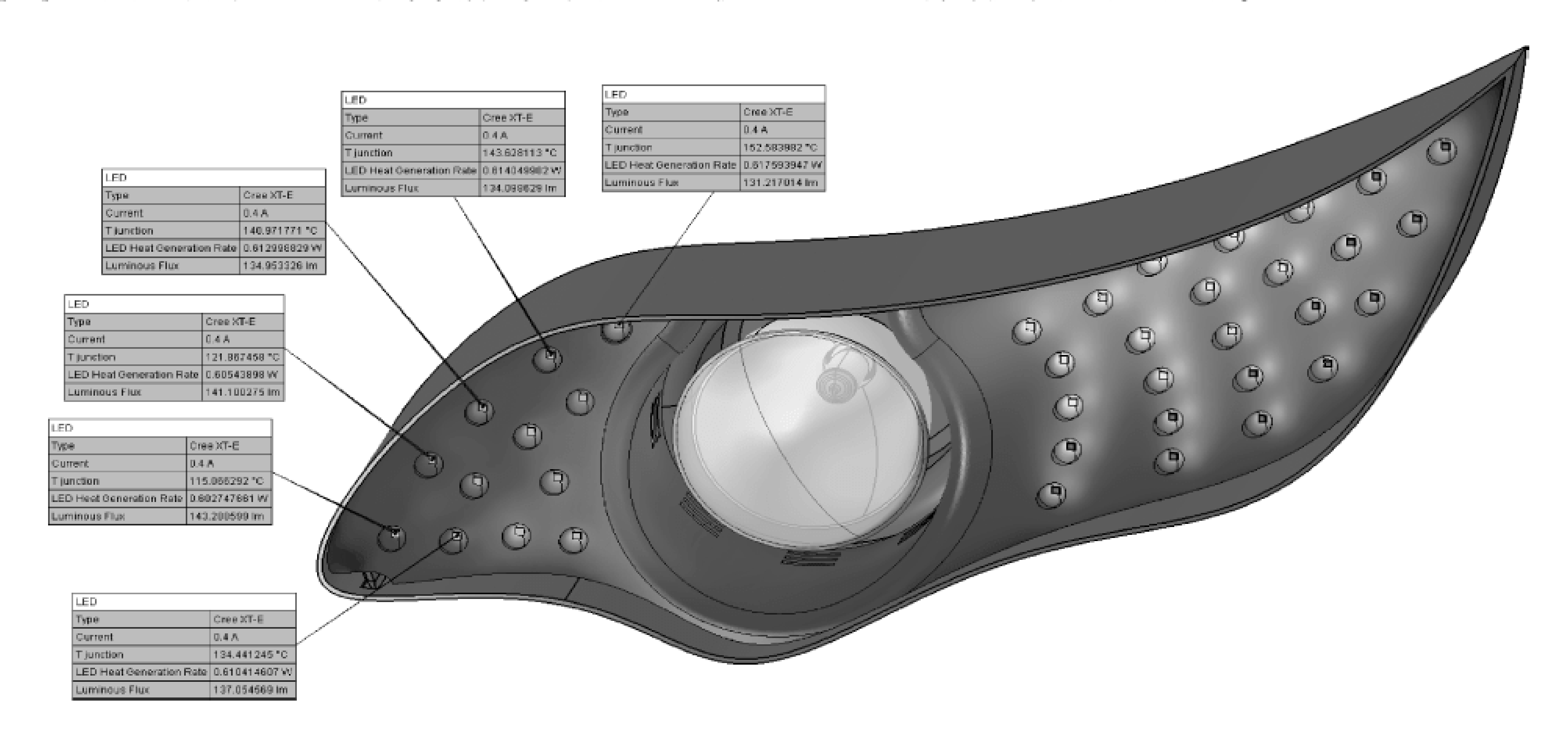


图 8-42 基于 LED 简化模型的 LED 仿真结果

8.6.3 简化模型

1. LED

通过使用 LED 简化模型和一个实体几何模型,可以简化 LED 的几何模型。

单击菜单 Flow Analysis→Insert→LED 命令,如图 8-43 所示,打开 LED 对话框。其中 Selection 选择区域用于确定替代 LED 的几何模型的顶面和底面;LED 选择区域用于选择数据库中预定义或新建的 LED 特性参数;Heat Power 或 Forward Current 为 LED 工作时的特性参数;Solid Parameters 为初始的固体温度。

2. PCB

通过使用 PCB 简化模型,可以简化 LED 系统中的 PCB 板。LED 系统中结构复杂的 PCB 板可以通过一个固体块来替代。

单击菜单 Flow Analysis→Insert→Printed Circuit Board 命令,如图 8-44 所示,打开 Printed Circuit Board 对话框。其中 Selection 选择区域用于选择替代 PCB 的固体块;Printed Circuit Board 可以选择数据库中预定义或新建的 PCB 特性参数。

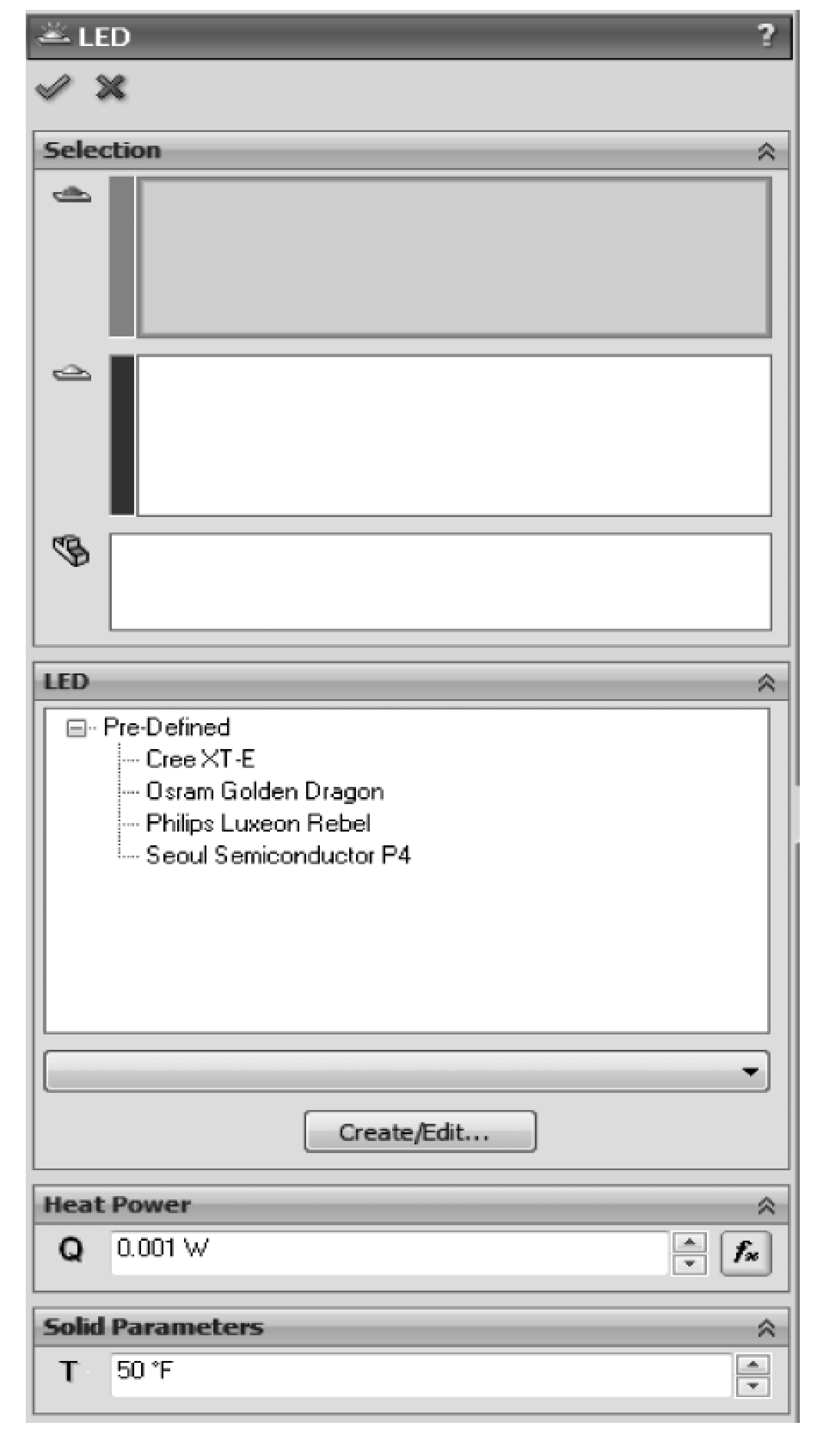


图 8-43　LED 对话框

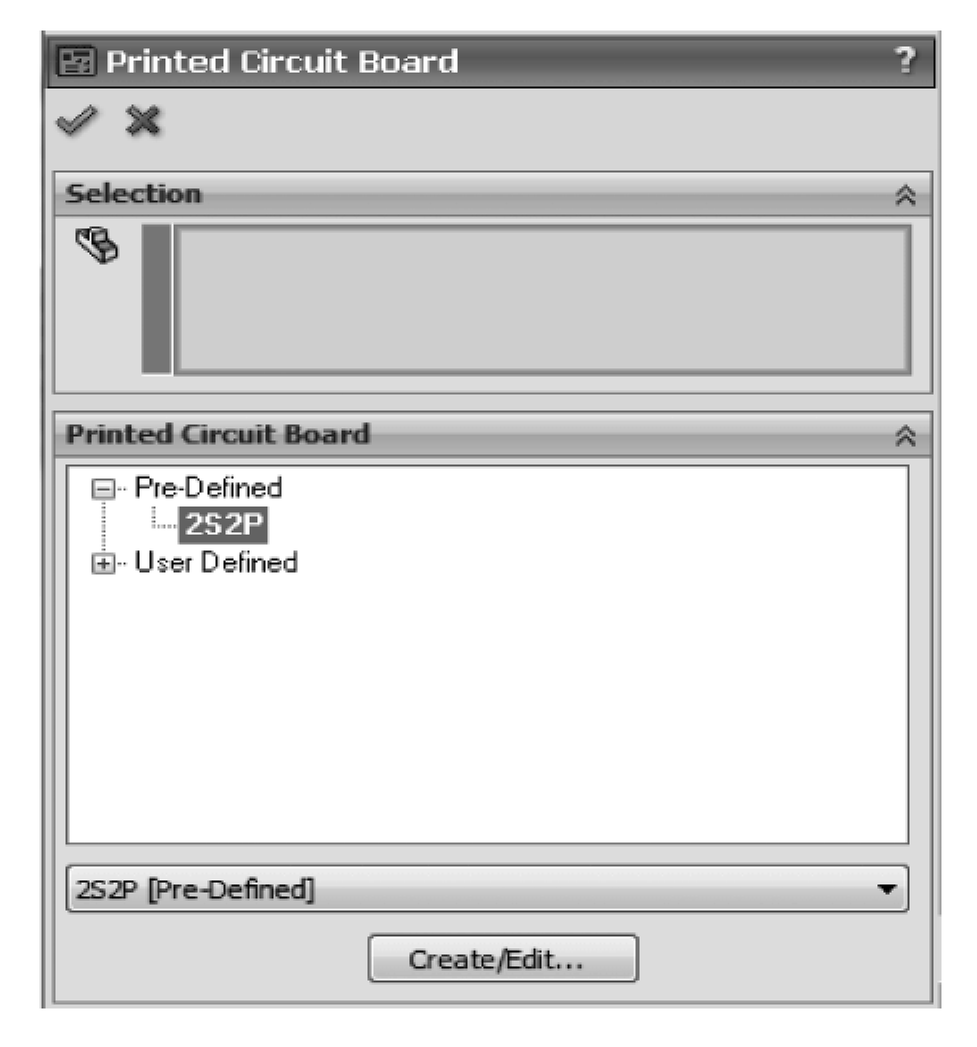


图 8-44　Printed Circuit Board 对话框

8.6.4　LED 数据库

如图 8-45 所示，在具有 LED 模块的工程数据库中，会有 LEDs、Printed Circuit Boards 和 Radiation Spectra 三类特性参数。

其中工程数据库中会增加 4 颗 LED 器件的特性数据，分别为 CREE XT-E、Osram Golden Dragon、Philips Luxeon Rebel 和 Seoul semiconductor P4。如图 8-46 所示，LED 器件的特性不仅仅包括了热特性，而且也包括了光通量随 LED 器件结温变化的光特性等数据。

如图 8-47 所示，在有 LED 模块的工程数据库中，轴流风扇的特性数据会增加很多。

如图 8-48 所示，在有 LED 模块的数据库中，Materials、Solids 和 Pre-Defined 下会增加 Ceramics 和 Laminates 两类特性参数。对于其他类型参数，在增加 LED 模块之后，也会有更多的特性参数。



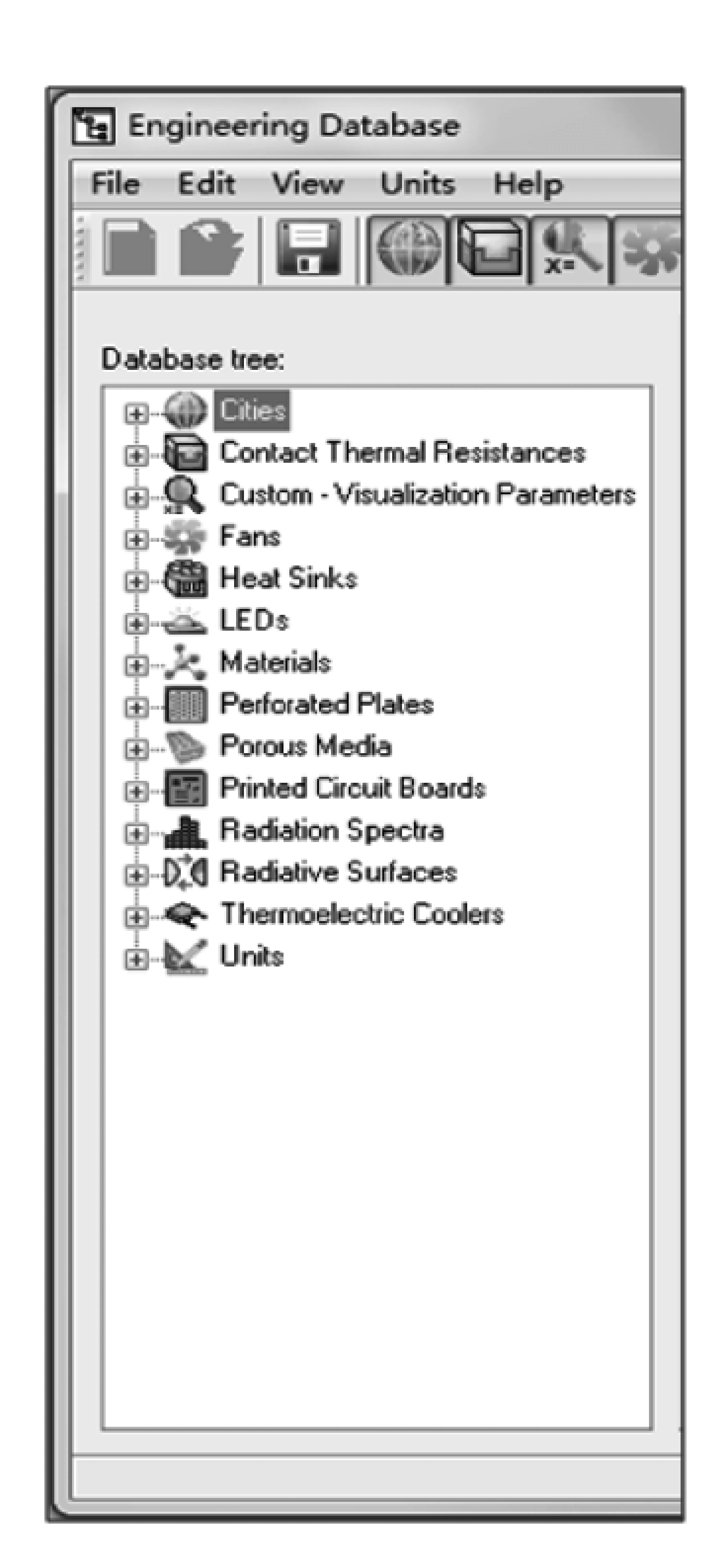


图 8-45　LED 模块在工程数据库中增加的特性参数

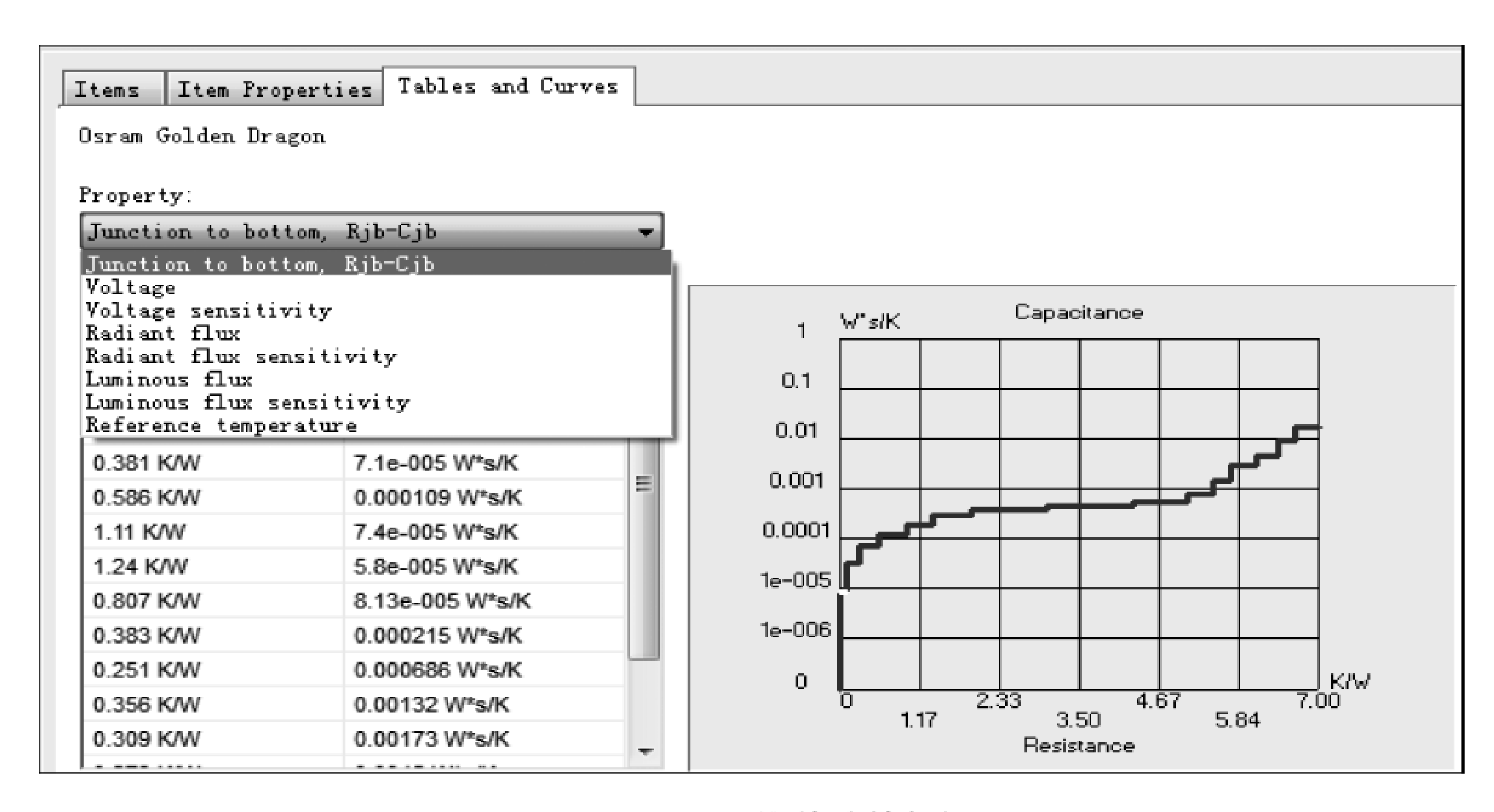
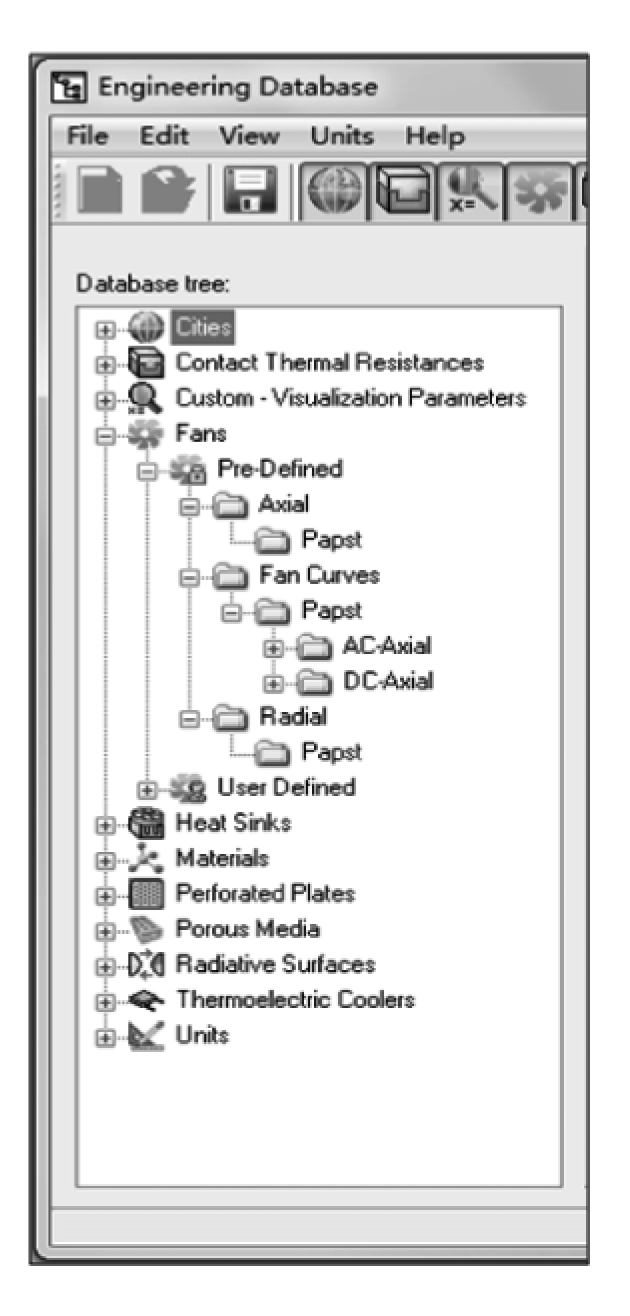


图 8-46　LED 器件特性数据



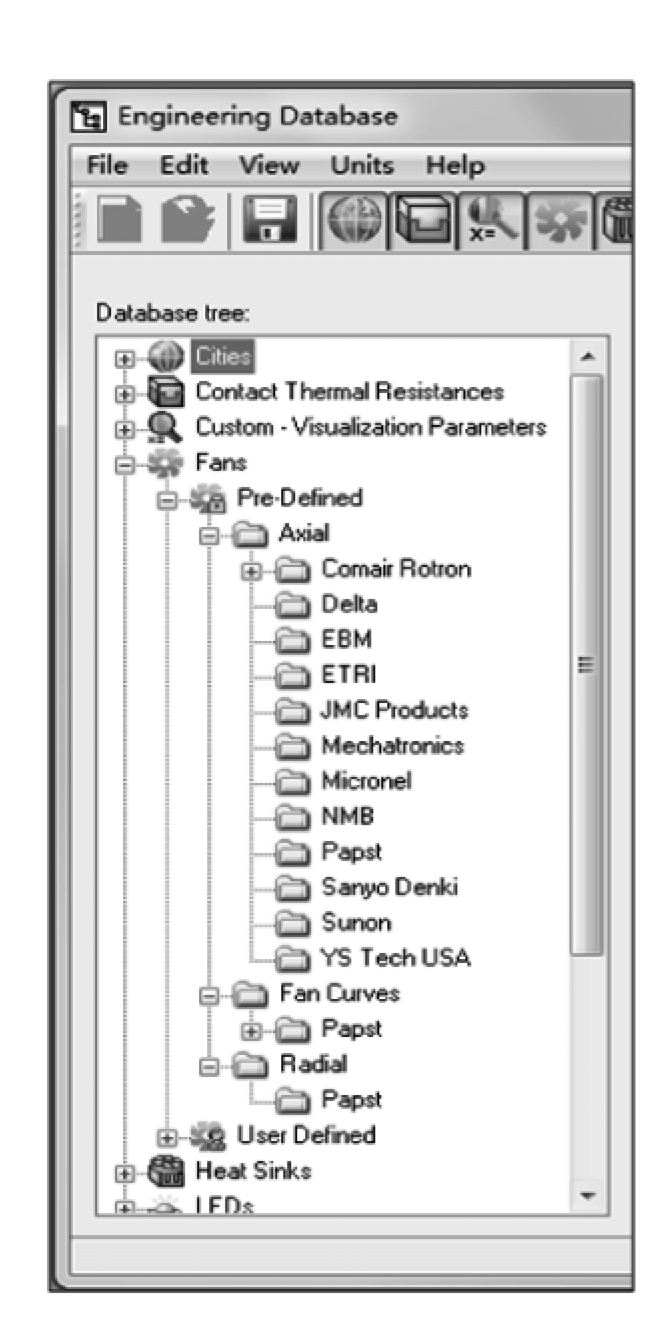
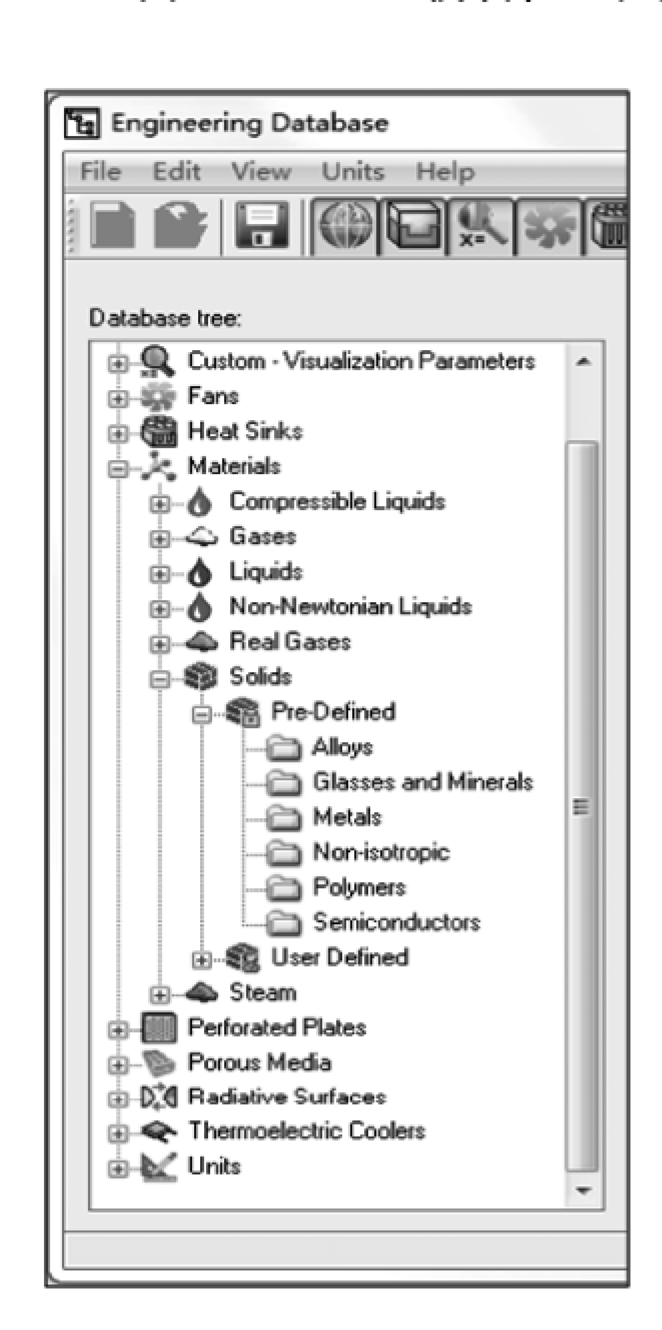


图 8-47 LED 模块在工程数据库增加的轴流风扇特性数据



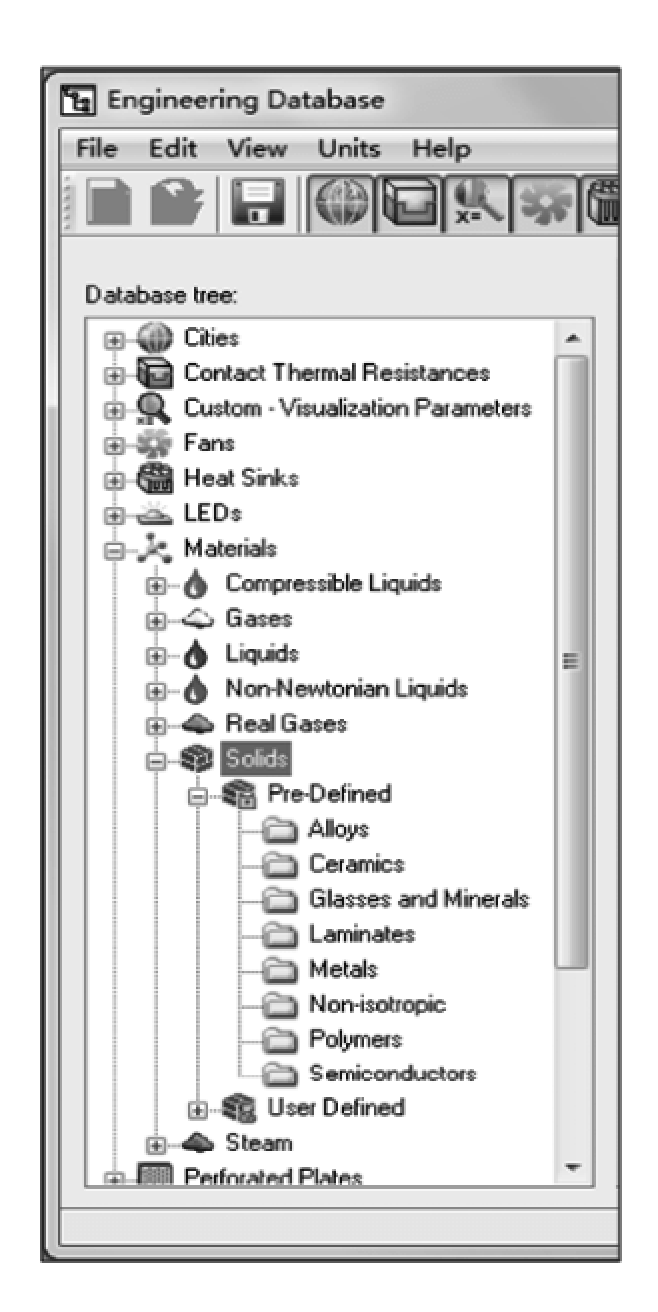


图 8-48 LED 模块在工程数据库增加的材料特性数据

8.7 热仿真软件的价值

目前，热仿真软件已经在许多工程领域得到广泛的应用，是进行传热、传质、动量传递及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术，由最初应用的航空航天领域扩展至气象、船舶、汽车设计、水利、建筑、生物医学工业、化工处理工业、涡轮机设计、半导体及电子设备设计、供热通风与空调工程等诸多工程领域。

以我们日常生活中接触的 LED 照明工程领域为例，热仿真软件在这其中扮演着越来越重要的角色，至少可以帮助解决以下三个方面的问题：首先是提升 LED 产品的研发效率，在产品设计阶段就可以评估其是否符合热设计要求，避免产品设计的反复；其次是深入了解 LED 产品的散热特点，识别引起 LED 高温的因素，为产品的散热结构优化提供可能；再次是减少测试样机和实验设备的投入，减少了产品研发过程中测试的费用支出。

思考题

1. 什么是热仿真软件？主要的用途是什么？有何优点？
2. 试讨论热仿真软件的数学基础与处理原理。
3. 试讨论热仿真软件与计算机的关系。

第9章 LED组件热特性仿真分析

9.1 LED组件热特性仿真分析介绍

图9-1所示为LED组件热特性仿真分析的几何模型，主要由LED器件、金属PCB基板（简称金属基板）和金属散热器构成。LED器件被置于金属基板之上，金属基板被贴覆至金属散热器上。LED器件产生的热量主要通过热传导的方式进入金属基板，热量在金属基板扩散之后，同样以热传导的方式进入金属散热器。最终散热器上的热量以自然对流和热辐射的形式离开散热器。本仿真分析主要关注LED器件结温是否超过设计限制，以及评估热辐射在LED组件散热架构中的重要性。

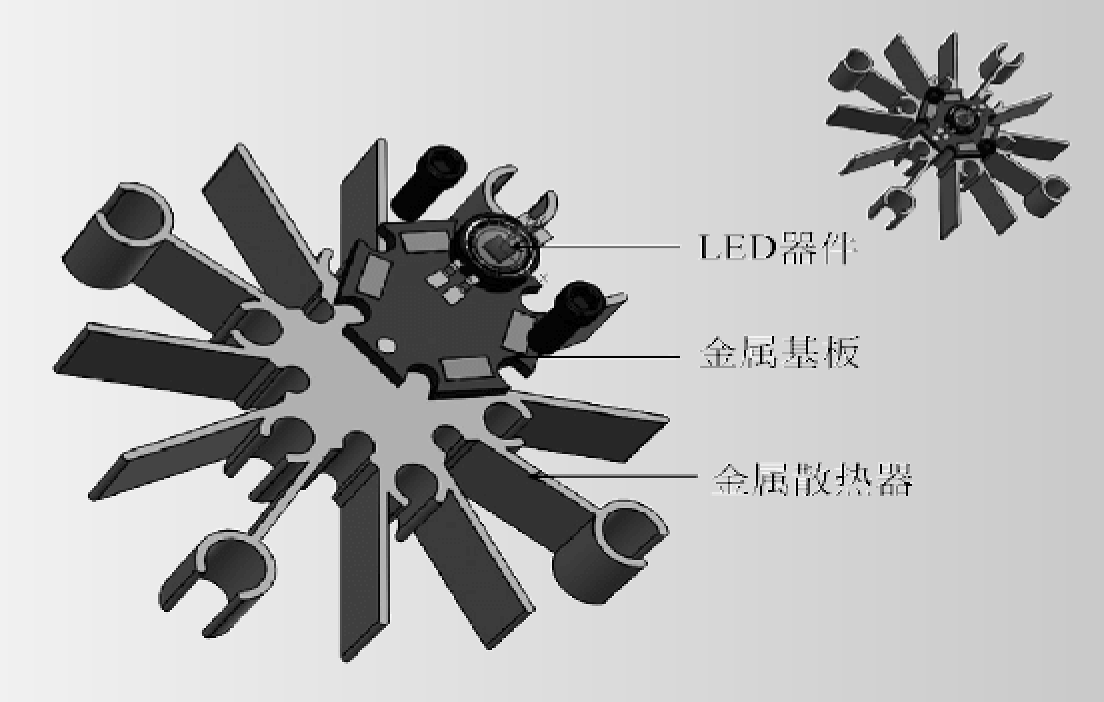


图9-1 LED组件热特性仿真分析的几何模型

9.2 LED组件热特性仿真

9.2.1 建立模型

1. 打开模型

单击File→Open。如图9-2所示，在Open对话框中，找到LED-

Module 文件夹中的 LED. SLDASM，并单击 Open 按钮。

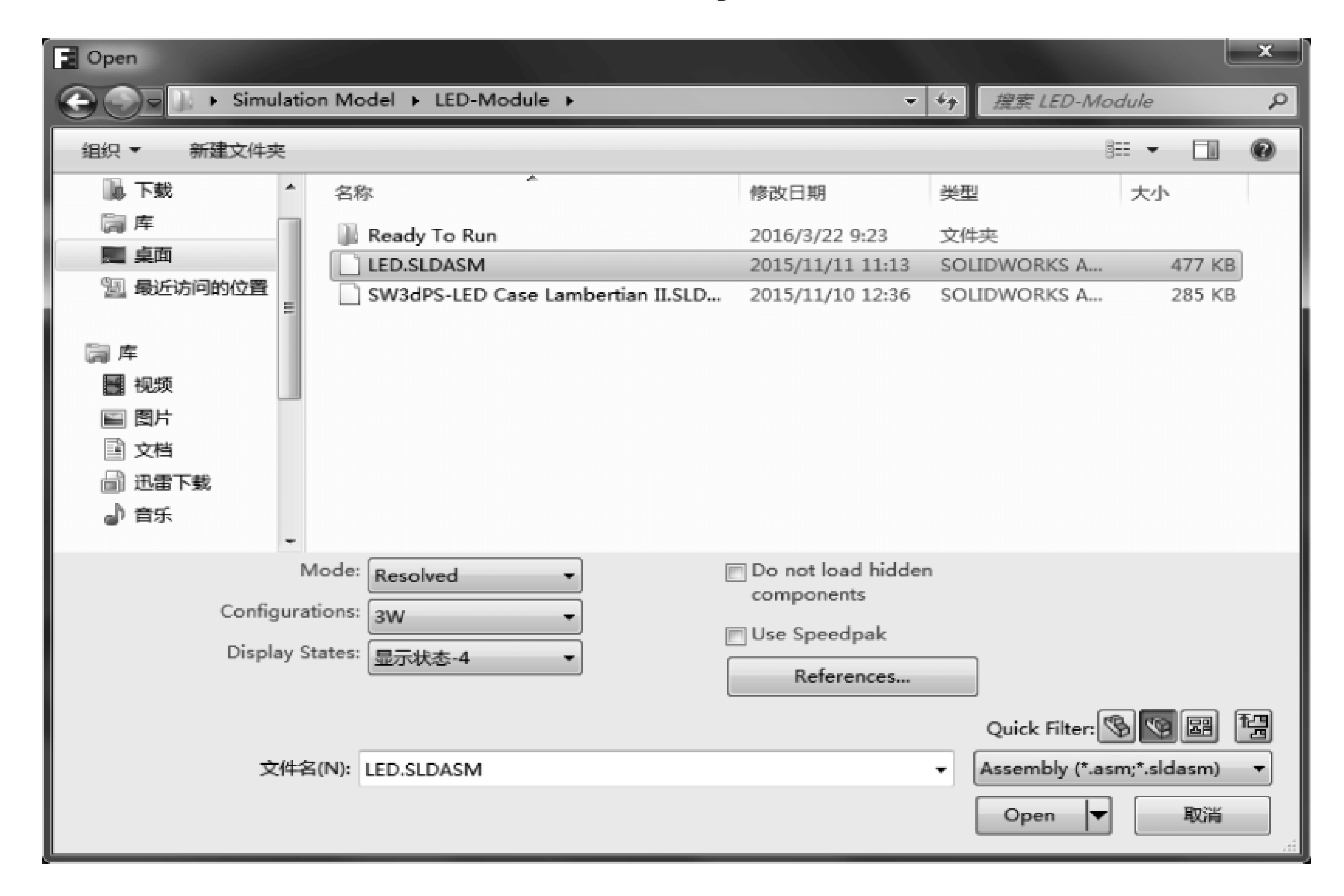


图 9-2　LED-Module 文件夹

2. 检查模型

单击 Flow Analysis→Tools→Check Geometry。如图 9-3 所示，在弹出的 Check Geometry 对话框中单击 Check 按钮，查看封装几何模型是否通过模型检查。

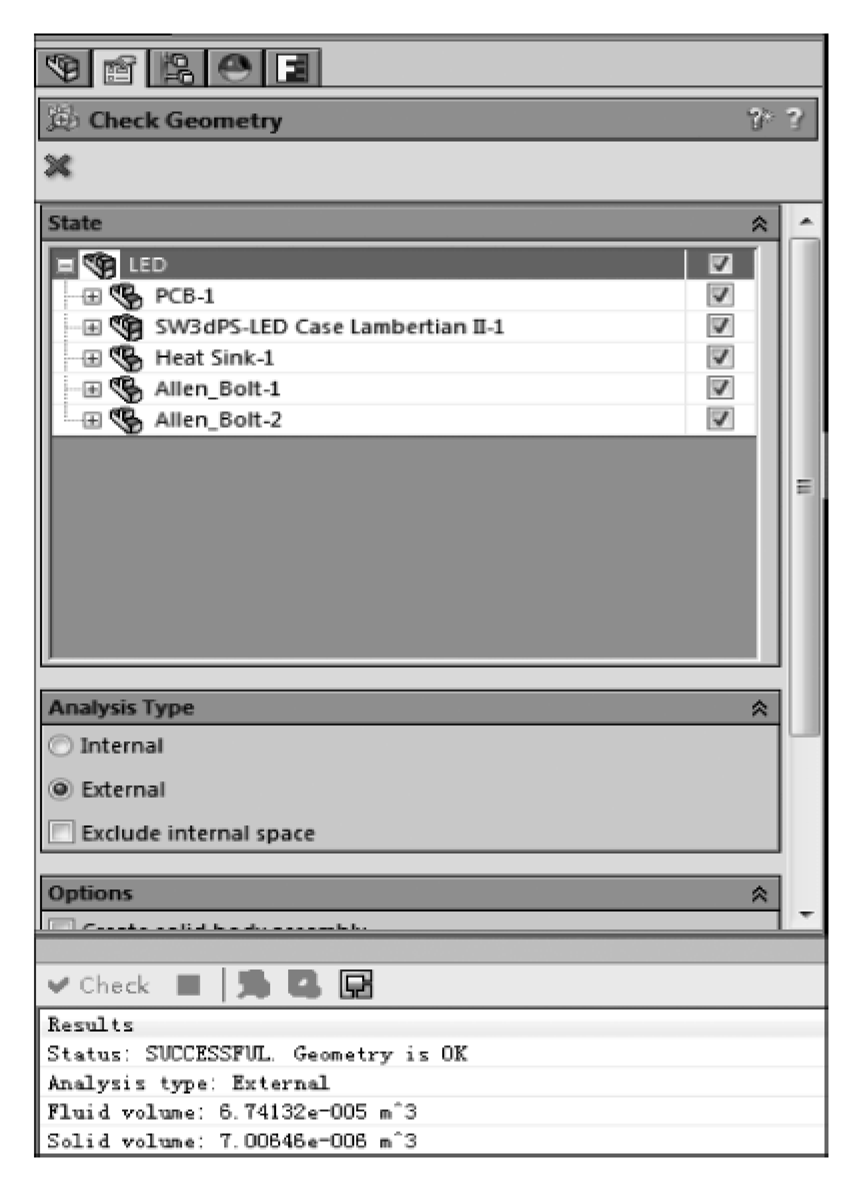


图 9-3　Check Geometry 对话框

单击 Check Geometry 对话框左上角红色图标×，退出 Check Geometry 对话框。

3. 创建 FloEFD 项目

单击 Flow Analysis→Project→Wizard。

如图 9-4 所示，进入 Wizard-Project Name 对话框之后，在 Project Name 中输入 LED_Module。

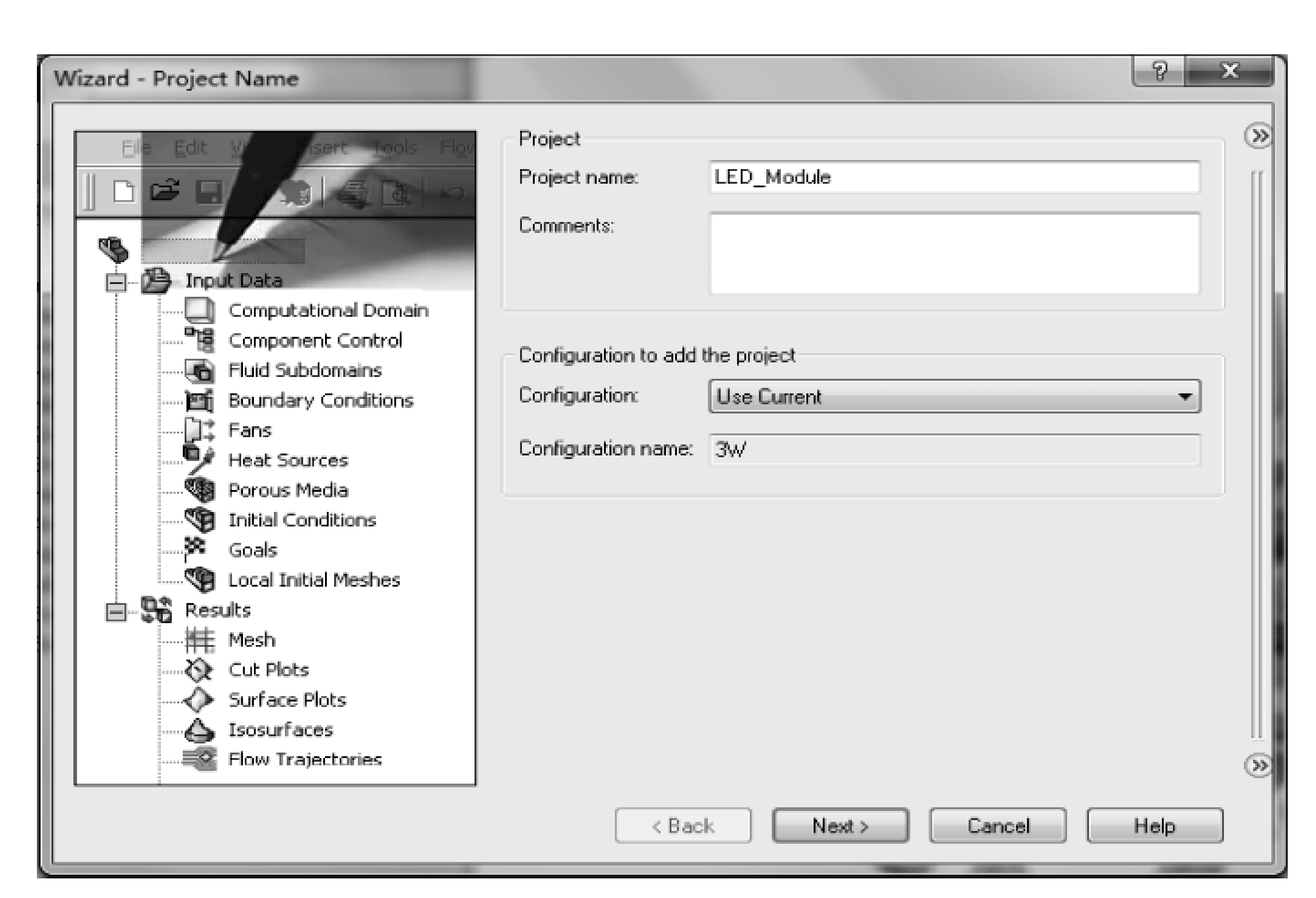


图 9-4　Wizard-Project Name 对话框

单击 Next 按钮。

如图 9-5 所示，进入 Wizard-Unit System 对话框之后，选择 SI(m-kg-s)作为此 FloEFD 项目的单位系统，并且将 Temperature 的单位修改为℃。

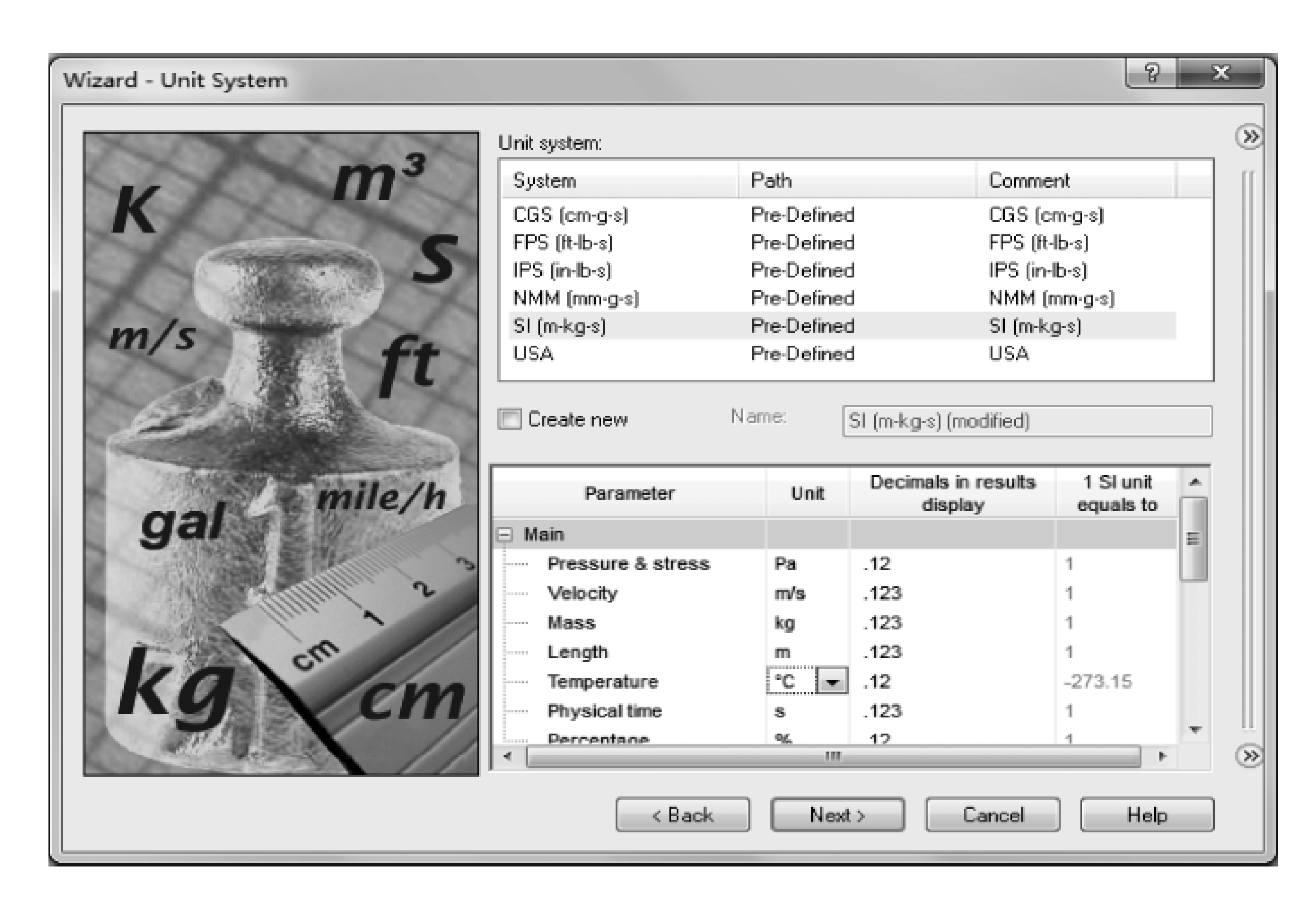


图 9-5　Wizard-Unit System 对话框

单击 Next 按钮。

如图 9-6 所示，进入 Wizard-Analysis Type 对话框之后，选择 External 作为 Analysis type。勾选 Heat Conduction in solids、Radiation 和 Gravity 选项。将 Environment temperature 设置为 25℃，Z Component 设置为 -9.81m/s^2。

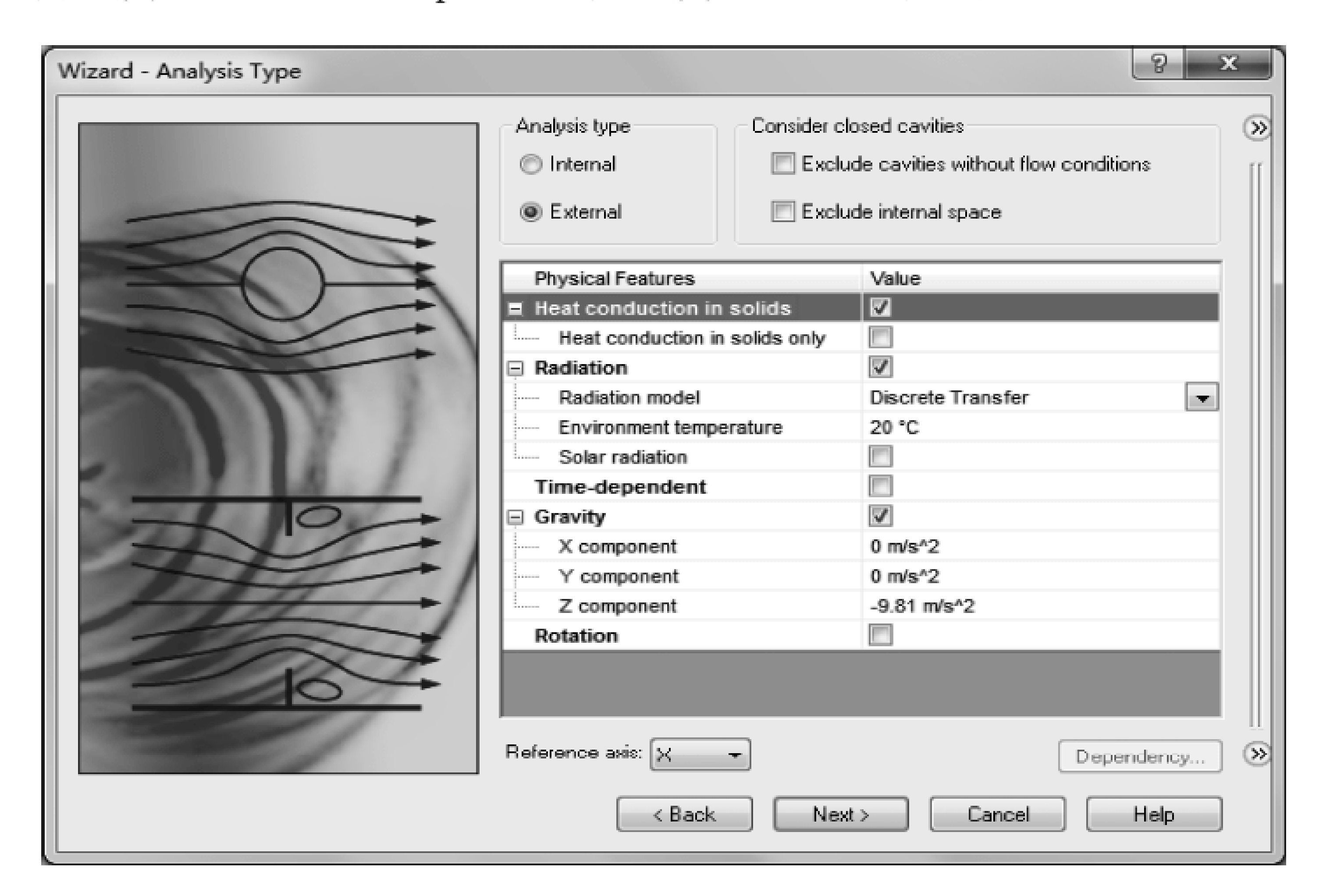


图 9-6　**Wizard-Analysis Type 对话框**

单击 Next 按钮。

如图 9-7 所示，进入 Wizard-Default Fluid 对话框之后，展开 Gases→Pre-Defined，选择 Air 作为项目的默认流体，并单击 Add 按钮，将 Flow type 设置为 Laminar and Turbulent。

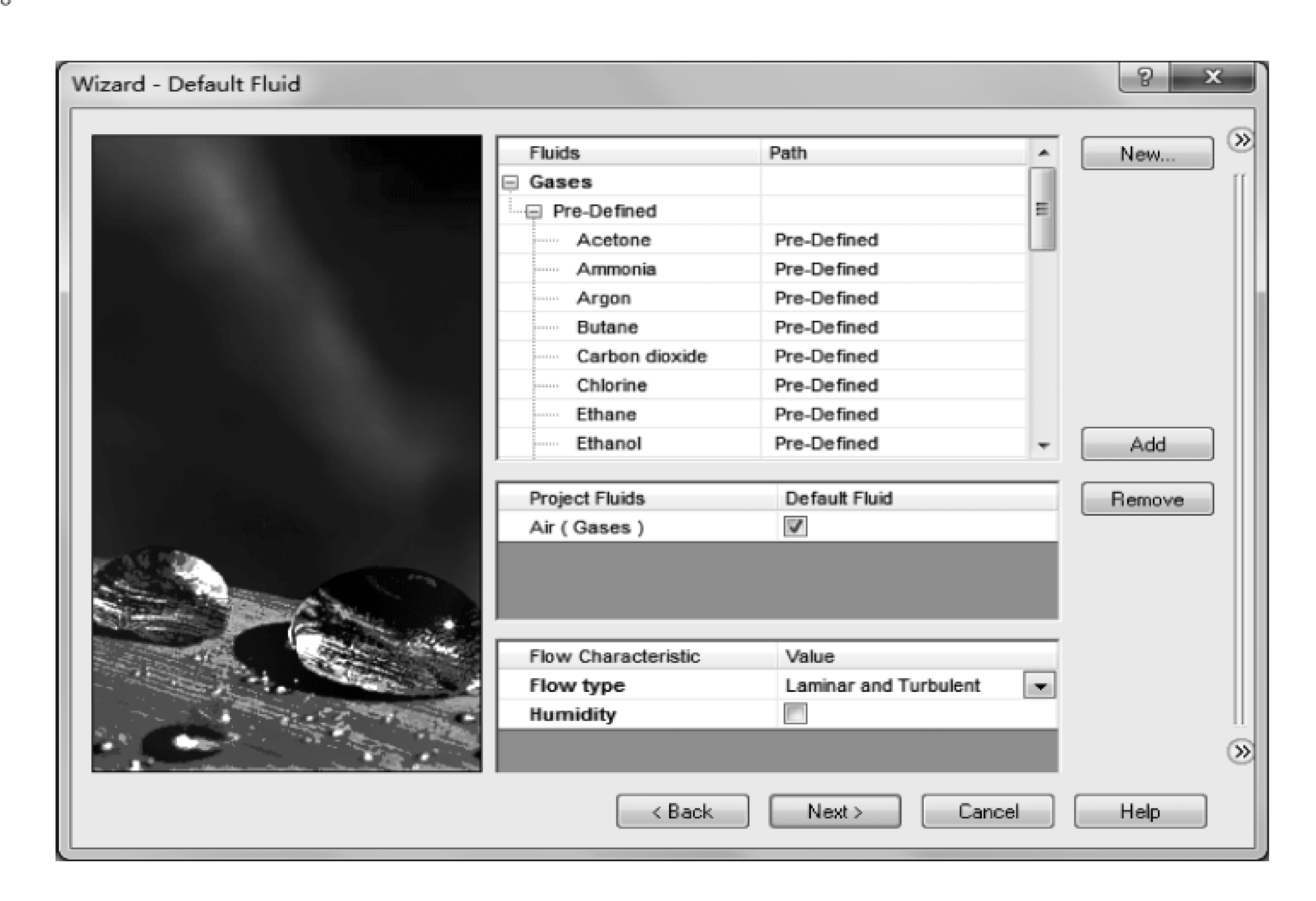


图 9-7　**Wizard-Default Fluid 对话框**

单击 Next 按钮。

如图 9-8 所示，进入 Wizard-Default Solid 对话框之后，展开 Pre-Defined→Metals，选择 Aluminum 6061 作为项目默认固体。

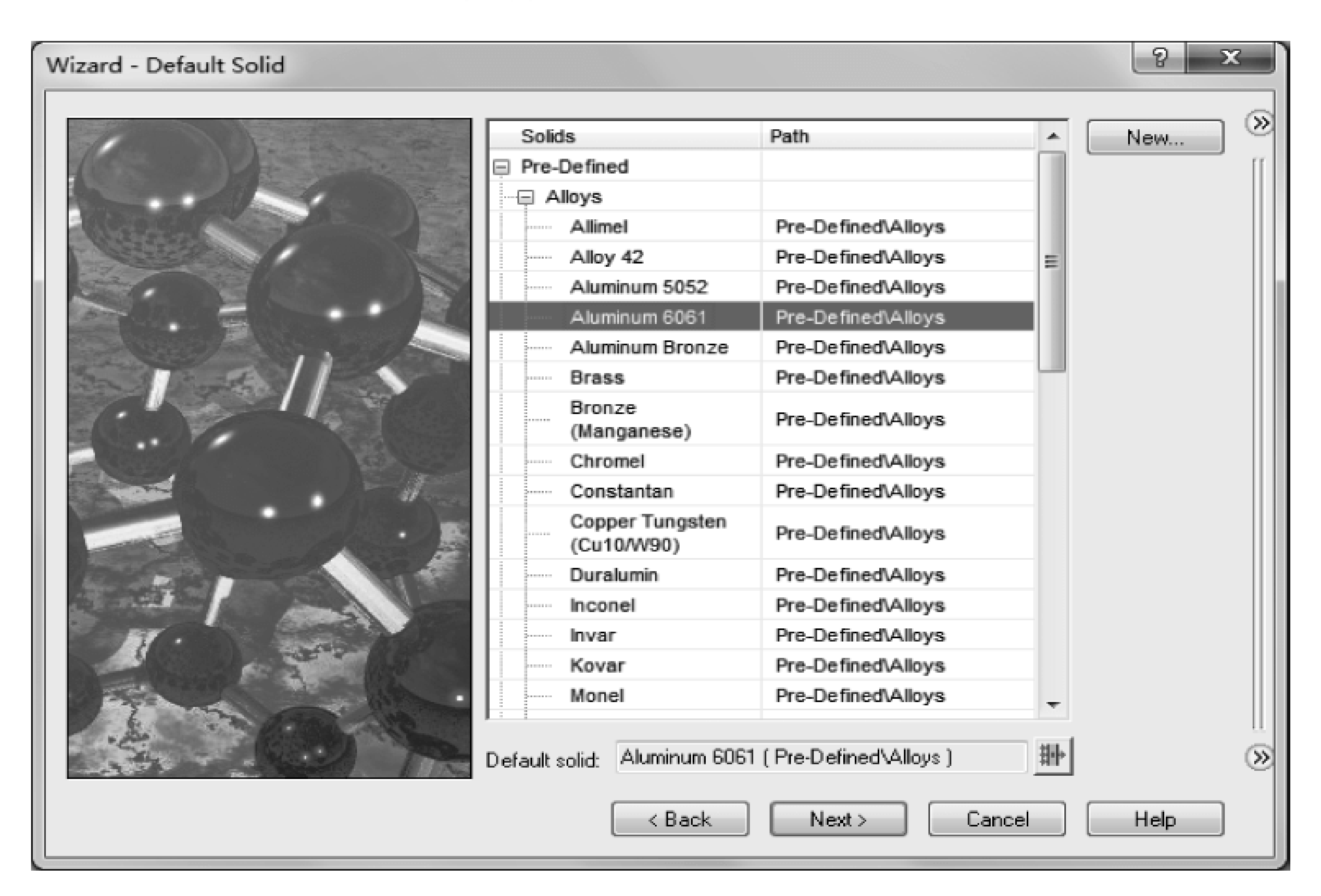


图 9-8　Wizard-Default Solid 对话框

单击 Next 按钮。

如图 9-9 所示，进入 Wizard-Wall Conditions 对话框之后，将 Default wall radiative surface 设置为 Whitebody wall。

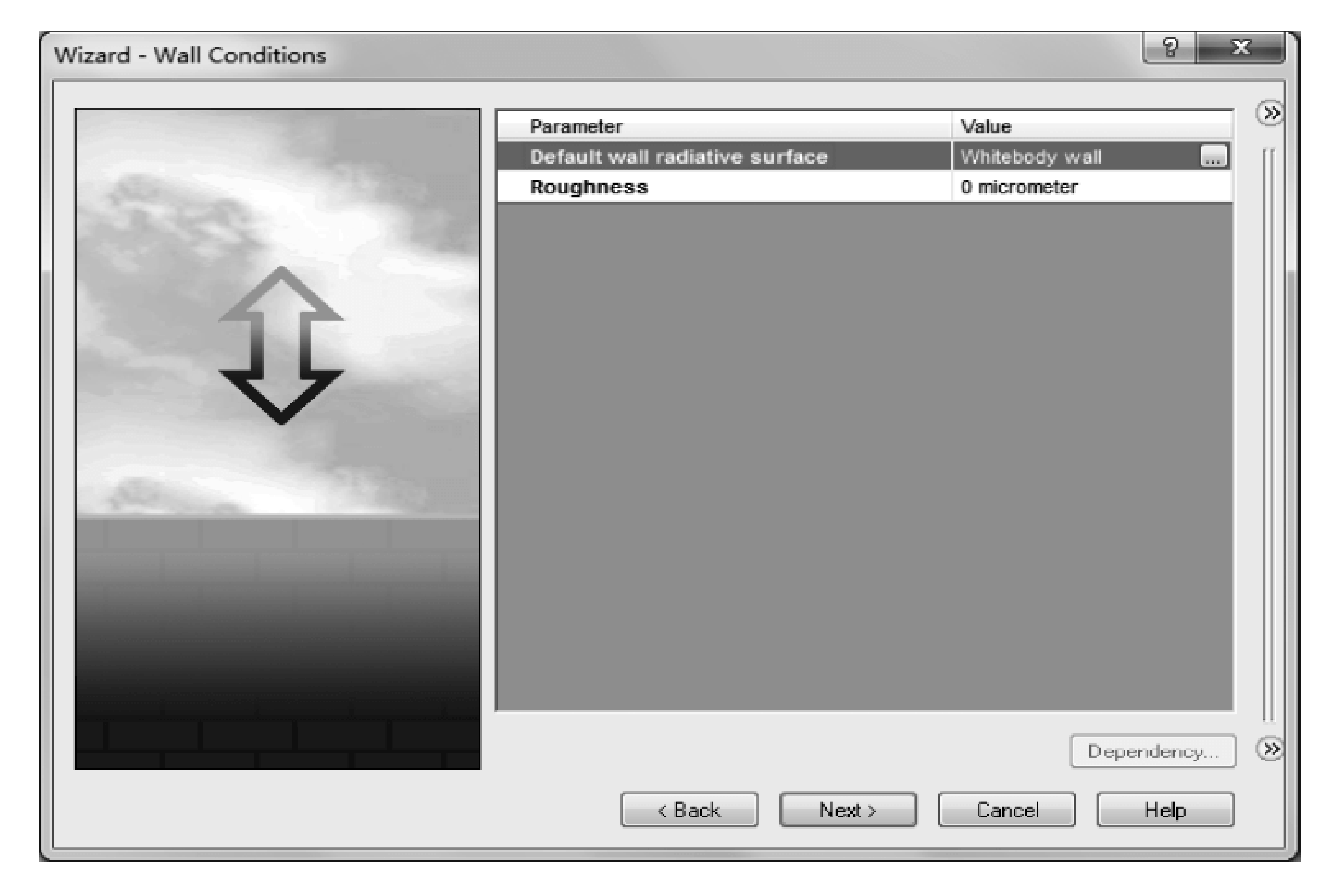


图 9-9　Wizard-Wall Conditions 对话框

如图 9-10 所示，进入 Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框之后，展开 Thermodynamic Parameters，将其 Temperature 设置为 20℃。展开 Solid Parameters，将其 Initial solid temperature 设置为 20℃。

单击 Finish 按钮，完成 FloEFD 项目创建。

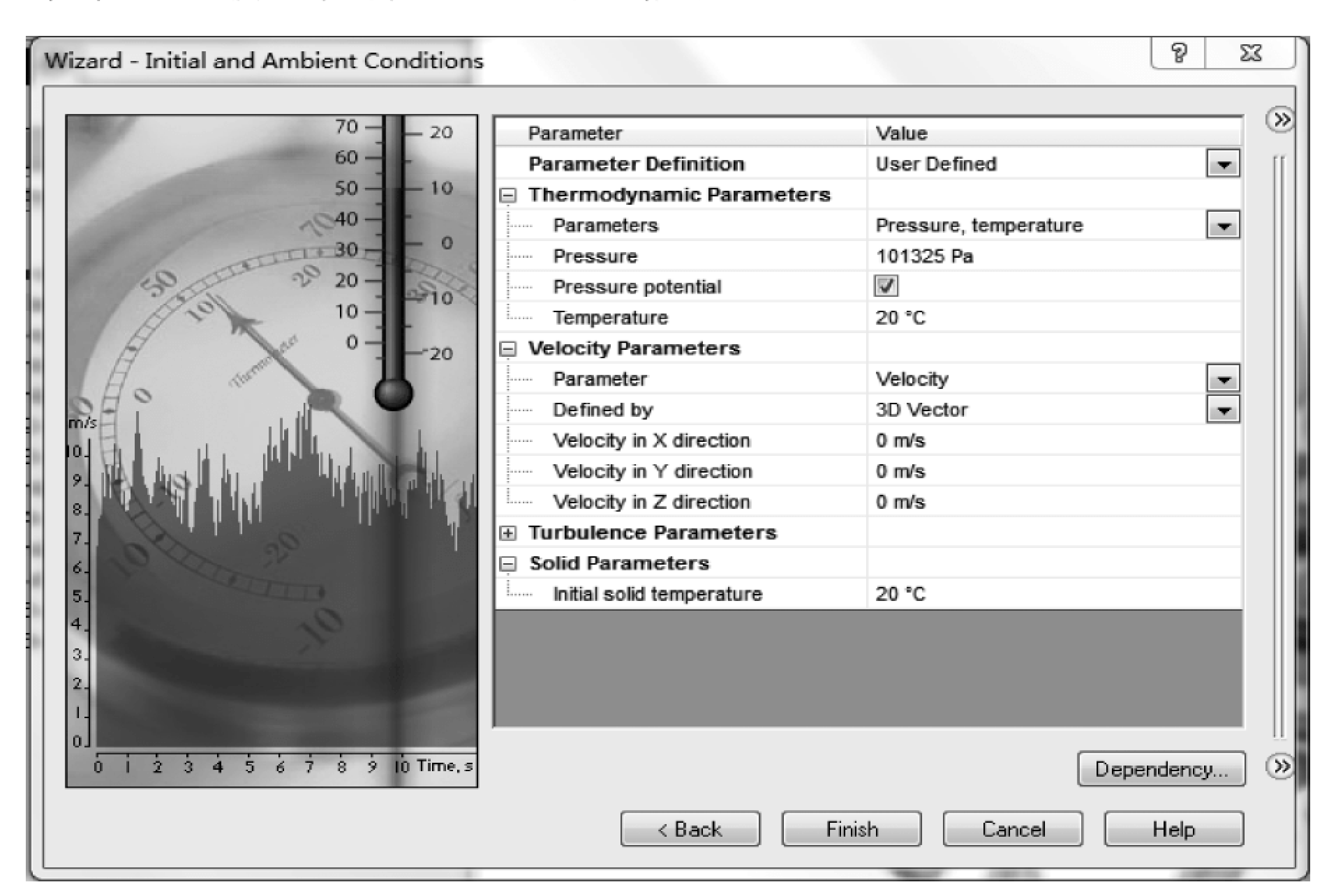


图 9-10　Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框

9.2.2　求解域调整

如图 9-11 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Computational Domain，选择 Edit Definition。

如图 9-12 所示，在弹出的 Computational Domain 对话框中，设置 Size and Conditions。

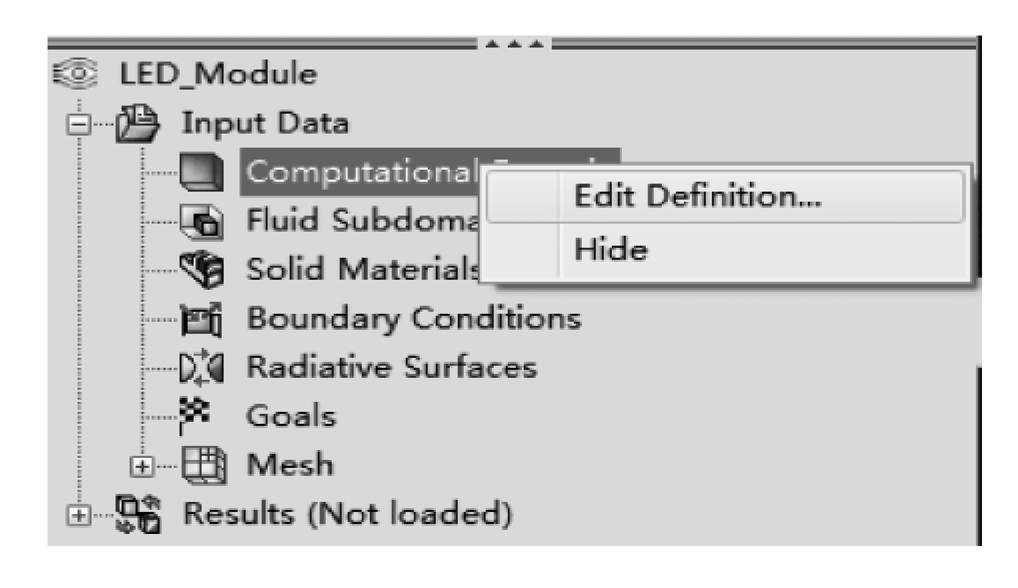


图 9-11　FloEFD 模型树

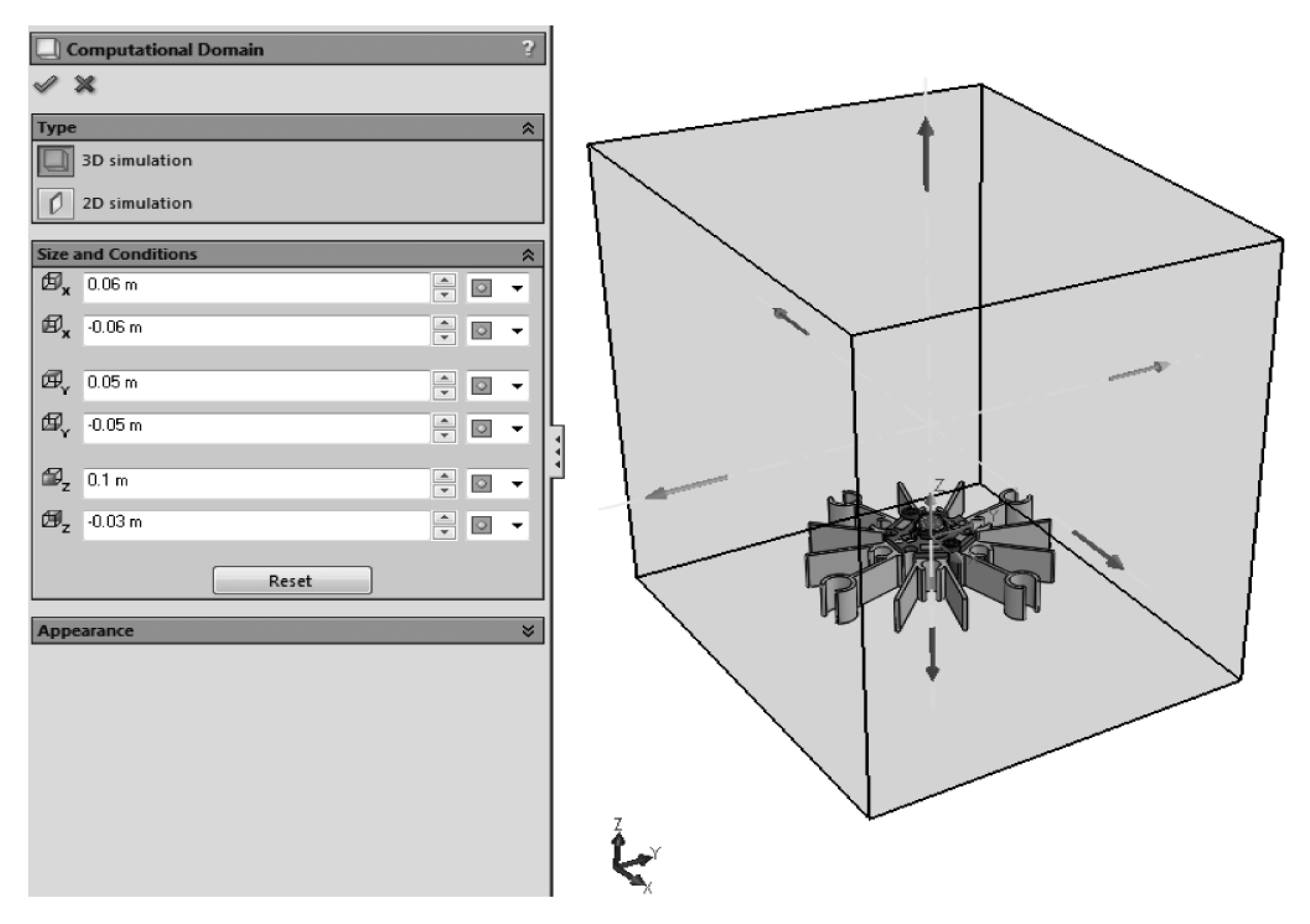


图 9-12 Computational Domain 对话框

9.2.3 参数设置

1. 定义固体材料

右击 FloEFD 模型树中的 Solid Material，在弹出的菜单中选择 Insert Solid Material。

如图 9-13 所示，在弹出的 Solid Material 对话框中，选择几何模型树中 SW3dps-LED Case Lambertian II_Imported3 <1>@SW3dps-LED Case Lambertian II <1>作为 Selection。选择 Pre-Defined→Glasses and Minerals→Plexiglass 作为 Solid。单击 Solid Material 对话框左上角绿色√，退出 Solid Materials 对话框，完成 LED 器件上表面材料定义。

采用以上相同的方法，将 SW3dps-LED Case Lambertian II_Imported4 <1>@SW3dps-LED Case Lambertian II<1>的材料定义为 Pre-Defined→Metals→Copper。

采用以上相同的方法，将 SW3dps-LED Case Lambertian II_Imported2 <1>@SW3dps-LED Case Lambertian II <1>的材料定义为 Pre-Defined→Semiconductors→Silicon。

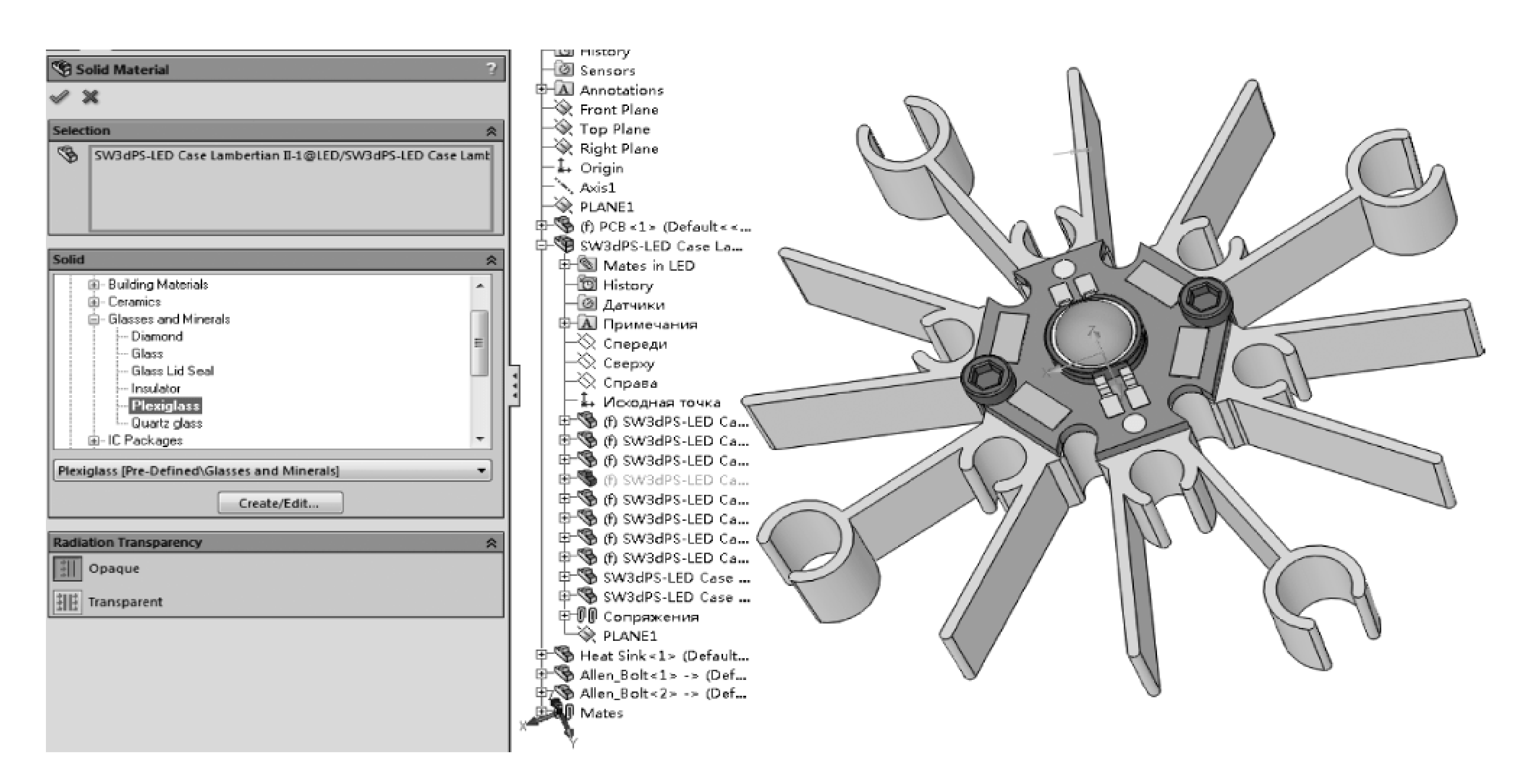


图 9-13　Solid Material 对话框

采用以上相同的方法，将 PCB<1>的材料定义为 Pre-Defined→Metals→Aluminum。

2. 定义热源

单击 Flow Analysis→Insert→Volume Source。

如图 9-14 所示，在弹出的 Volume Source 对话框中，选择几何模型树中 SW3dps-LED Case Lambertian II_Imported2<1>@SW3dps-LED Case Lambertian II<1>作为 Selection。在 Parameter 中选择 Heat Generation Rate，并且在 Heat Generation Rate 中输入 2.5W。单击 Volume Source 对话框中左上角绿色√，退出 Volume Source 对话框，完成 LED 器件热源的定义。

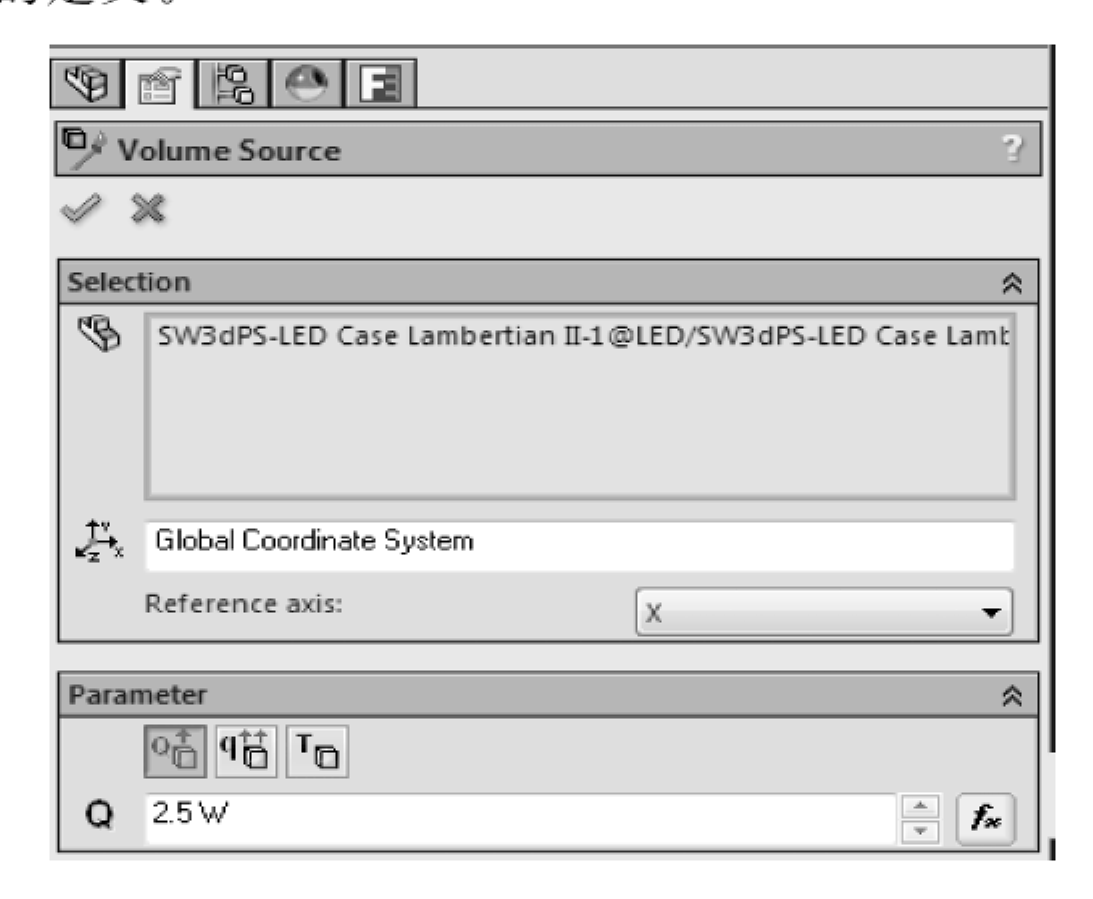


图 9-14　Volume Source 对话框

3. 创建辐射表面

单击 Flow Analysis→Tools→Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 设置对话框中，选择 Database 设置树下的 Radiative Surface→User Defined。

单击 File→New，在弹出 Item Properties 选项卡中，双击激活单元格，如图 9-15 所示，设置相应的特性值。

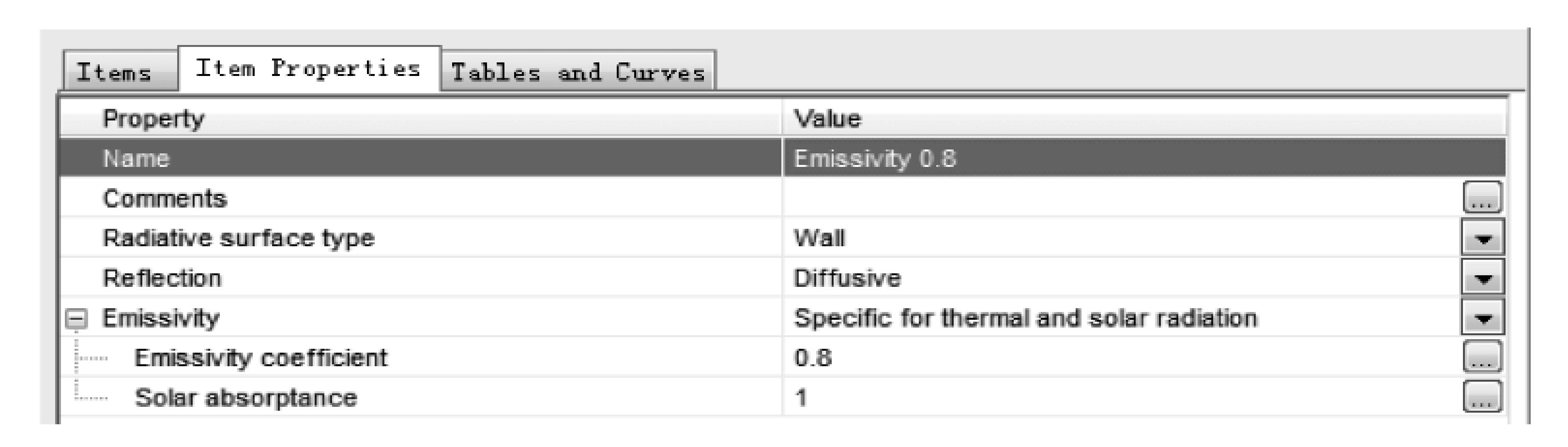


图 9-15 Emissivity 0.8 特性值

4. 定义辐射表面

单击 Flow Analysis→Insert→Radiative Surface。如图 9-16 所示，在弹出的 Radiative Surface 对话框中，选择几何模型树中的 Heat Sink-1@LED 作为 Selection。选择 User Defined→Emissivity 0.8 作为 Type。

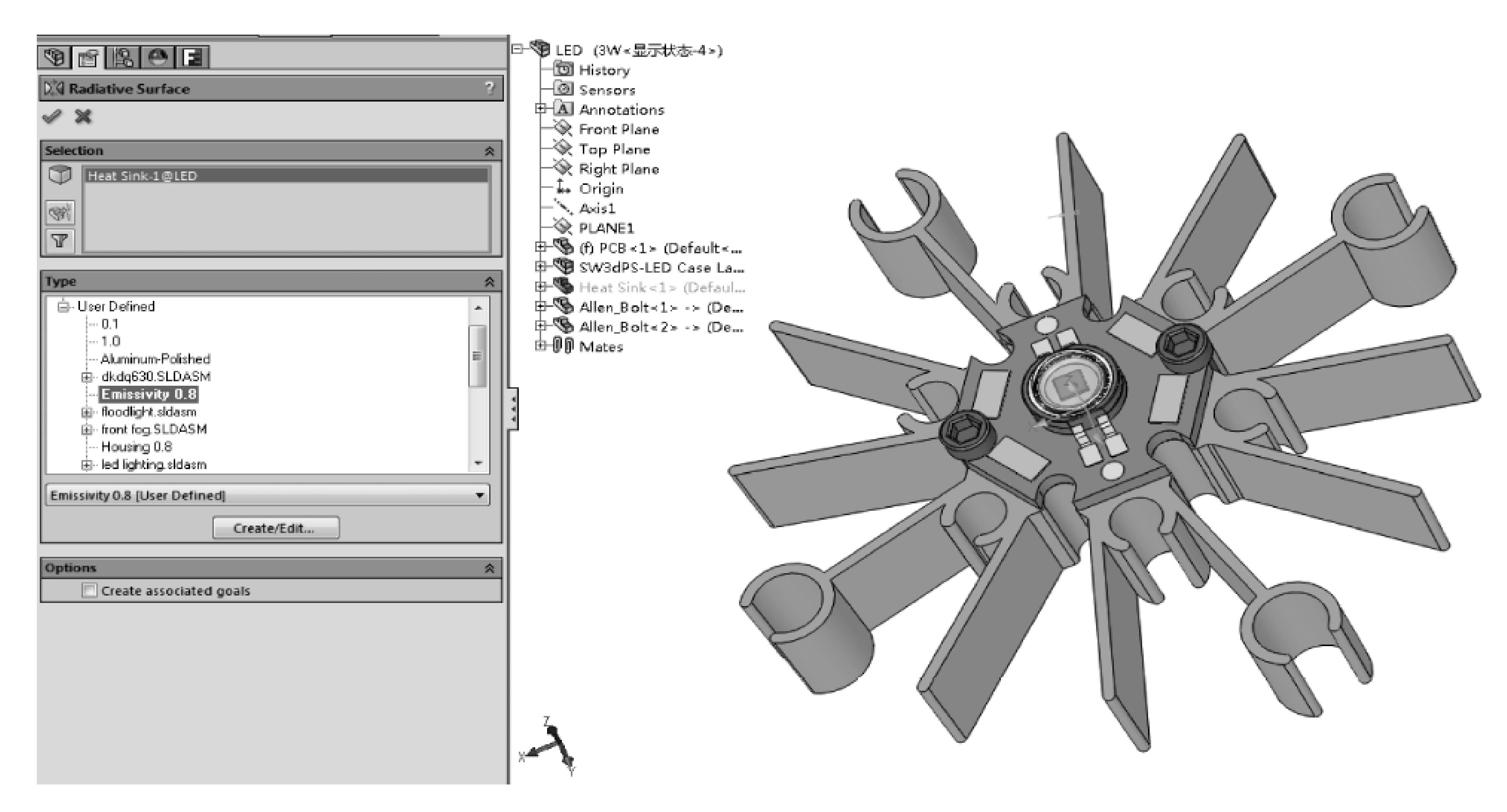


图 9-16 Radiative Surface 对话框

单击 Radiative Surface 对话框左上角绿色√，退出 Radiative Surface 对话框，完成散热表面辐射特性定义。

采用以上相同的方法，设置 PCB<1>的辐射表面特性为 Emissivity 0.8。

5. 定义工程目标

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，并且在弹出的菜单中选择 Insert Volume Goal。

如图 9-17 所示，在弹出的 Volume Goals 对话框中，选择几何模型 Heat Sink-1@LED 作为 Selection。在 Parameters 中，勾选 Temperature(Solid)的 Max。单击 Volume Goals 对话框左上角绿色√，退出 Volume Goals 对话框。创建 Heat Sink 的最高温度体积目标。

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，并且在弹出的菜单中选择 Insert Volume Goal。

如图 9-18 所示，在弹出的 Volume Goals 对话框中，选择几何模型 SW3dps-LED Case Lambertian II_Imported2<1>@SW3dps-LED Case Lambertian II<1>作为 Selection。在 Parameters 中，勾选 Temperature(Solid)的 Ave。单击 Volume Goals 对话框左上角绿色√，退出 Volume Goals 对话框。



图 9-17 Volume Goal 对话框

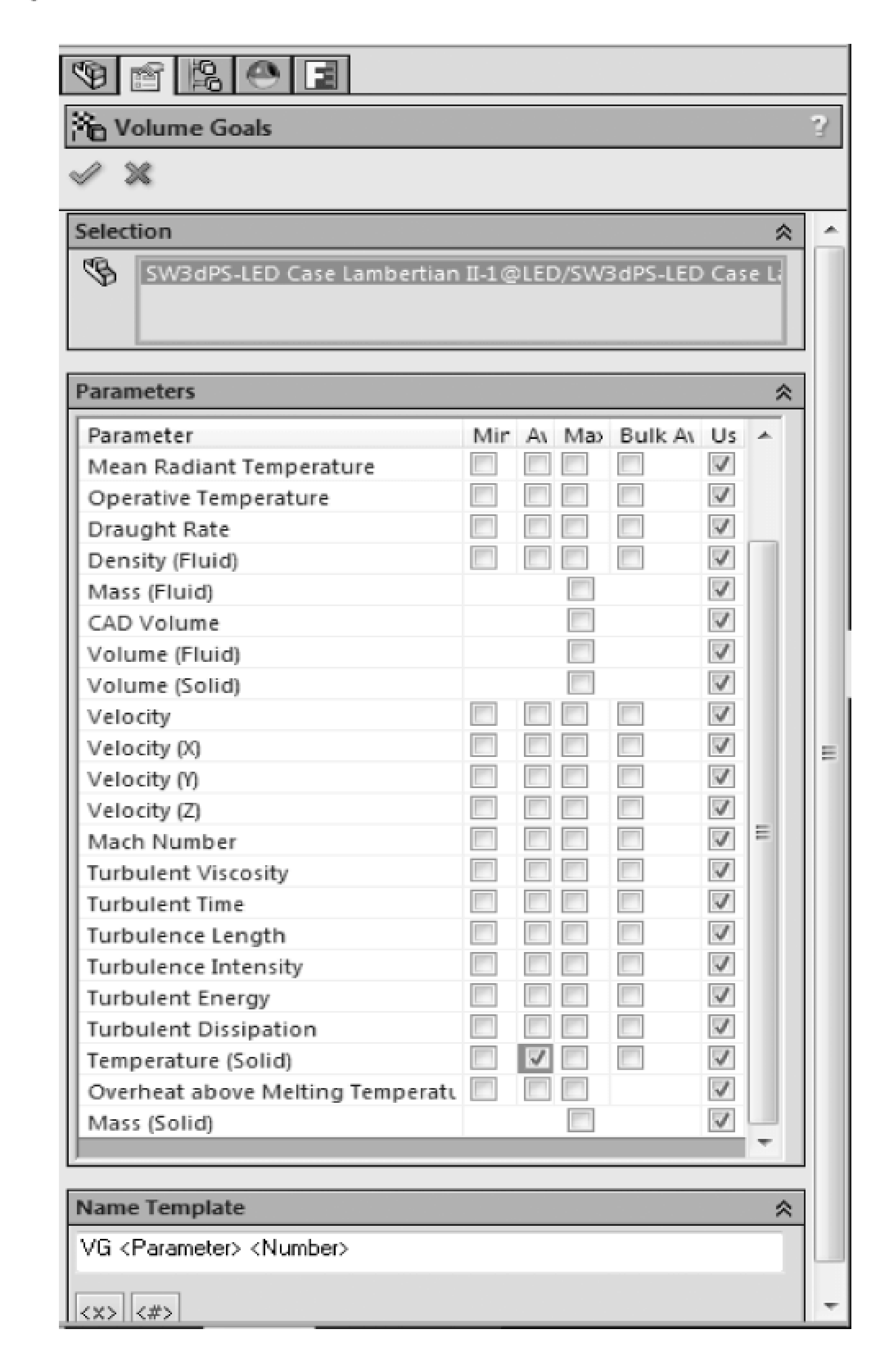


图 9-18 Volume Goal 对话框

9.2.4 网格设置

如图 9-19 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Global Mesh，选择 Edit Definition。

在弹出的 Global Mesh Settings 窗口中，如图 9-20 所示，设置 Type 和 Settings。单击 Global Mesh Settings 对话框左上角绿色√，退出 Global Mesh Settings 对话框。

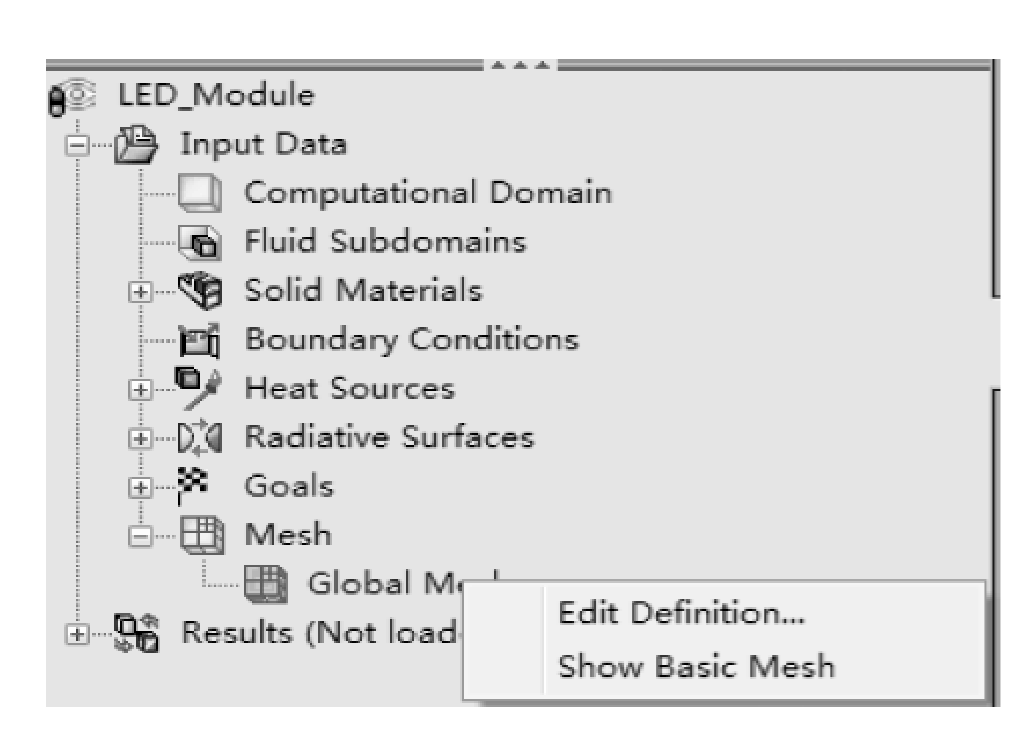


图 9-19 FloEFD 模型树

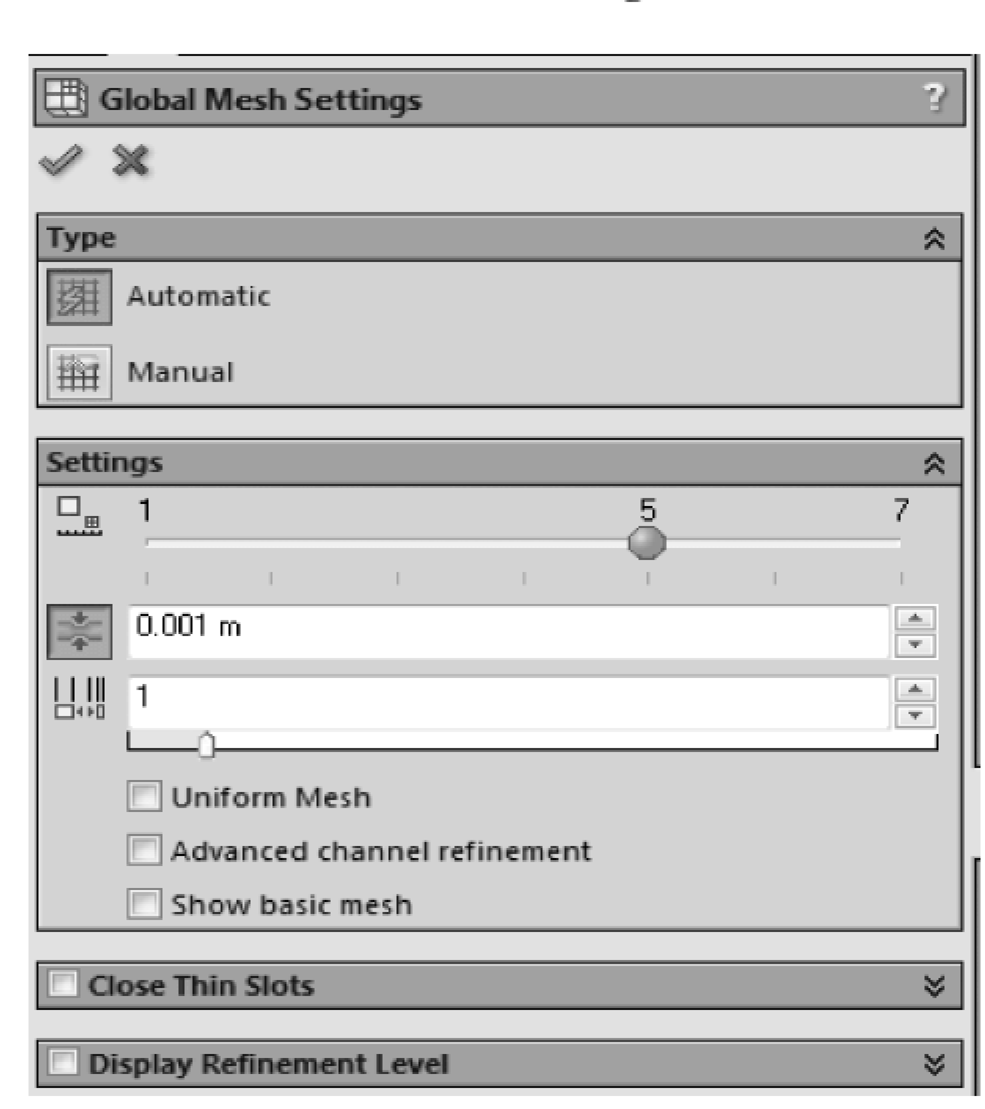


图 9-20 Global Mesh Settings

9.2.5 求解计算

求解计算

（1）单击 Flow Analysis→Solve→Batch Run。如图 9-21 所示，设置求解计算选项。其中 CPU and memory usage 中的 Use 确定了参与计算的 CPU 核数，可根据实际计算机配置进行调整。

（2）单击 Run 对话框中的 Run 按钮，对 LED_Module 项目进行求解计算。

9.2.6 仿真结果分析

1. 查看目标

如图 9-22 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Results 下的 Goal Plots，并且选择 Insert。

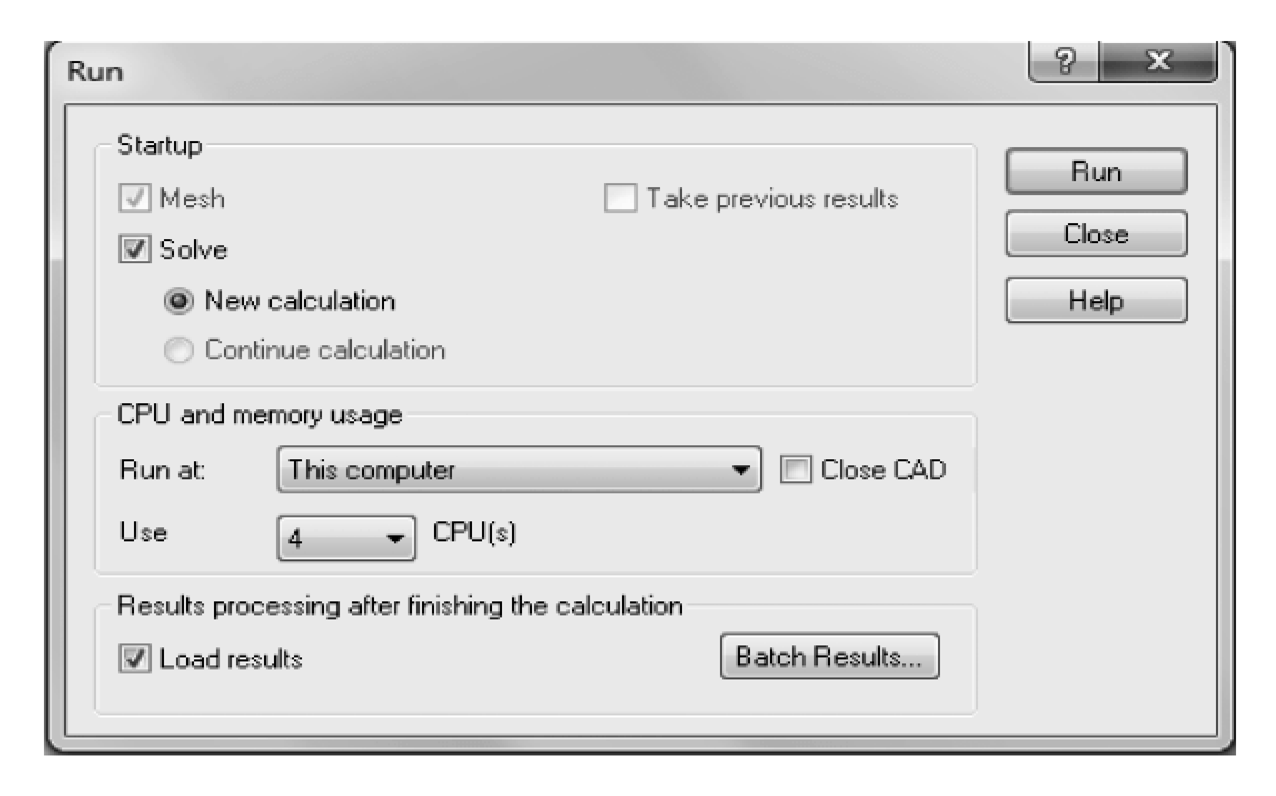


图 9-21 Run 对话框

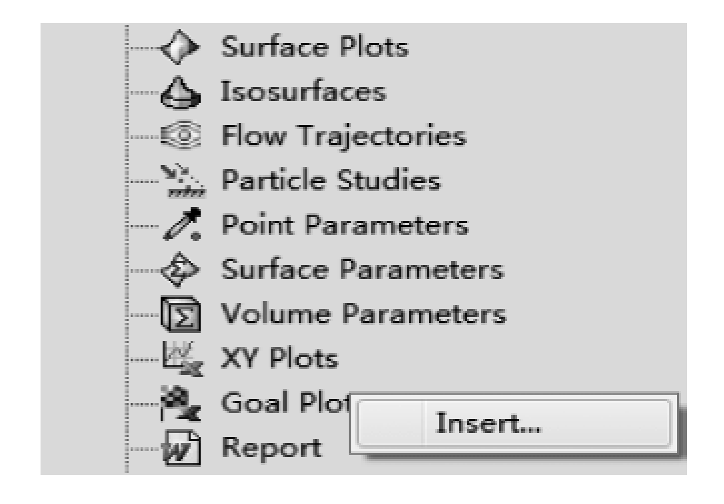
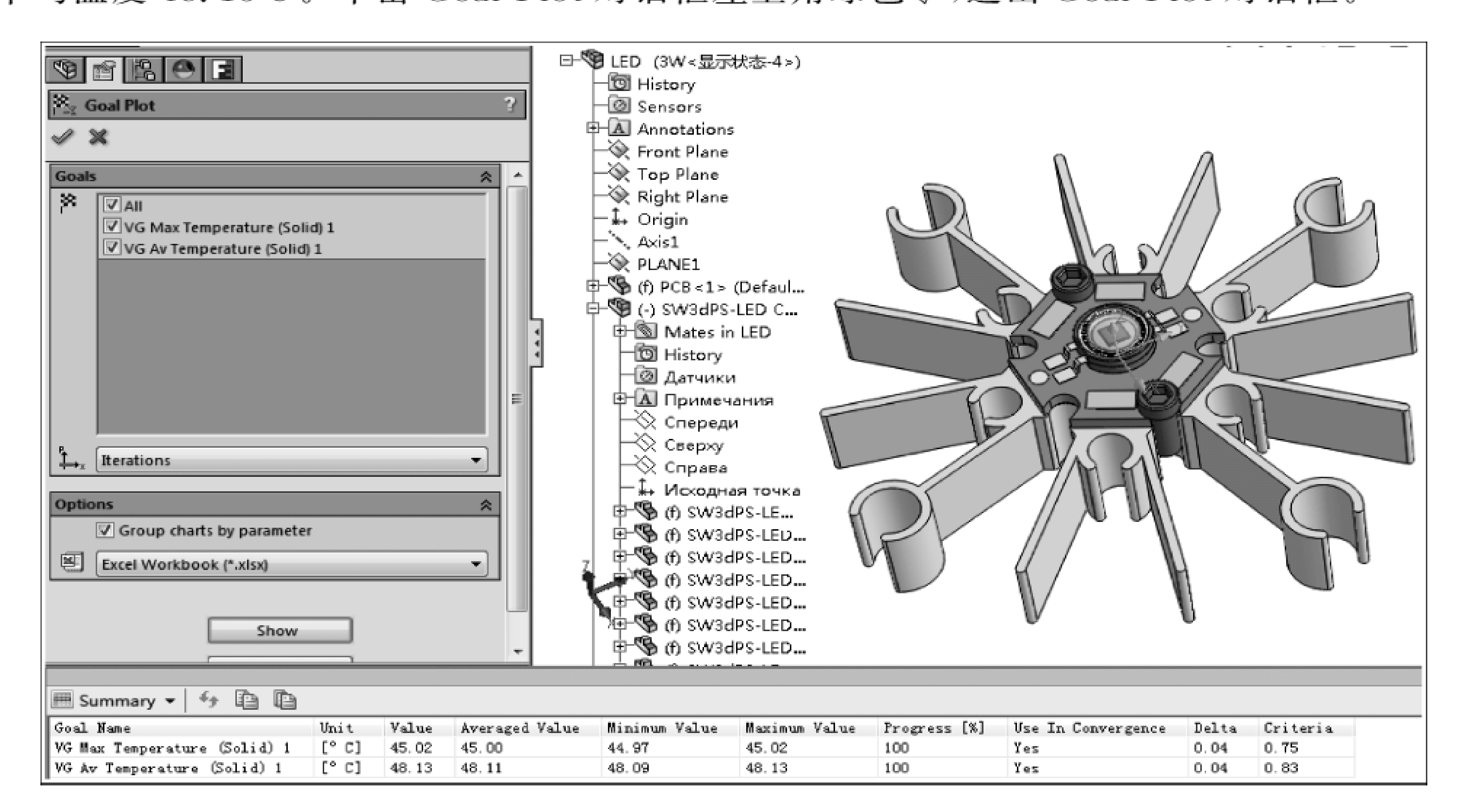


图 9-22 FloEFD 模型树

如图 9-23 所示，在弹出的 Goal Plot 对话框中，勾选 All，并且勾选 Options 的 Group Charts by parameter，单击 Show 按钮。其中散热器的最高温度为 45.02℃，LED 器件的平均温度 48.13℃。单击 Goal Plot 对话框左上角绿色√，退出 Goal Plot 对话框。



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
VG Max Temperature (Solid) 1	[° C]	45.02	45.00	44.97	45.02	100	Yes	0.04	0.75
VG Av Temperature (Solid) 1	[° C]	48.13	48.11	48.09	48.13	100	Yes	0.04	0.83

图 9-23 Goal Plot 对话框

2. 查看表面参数

如图 9-24 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Results 下的 Surface Parameters，并且选择 Insert。

如图 9-25 所示，在弹出的 Surface Parameters 对话框中，勾选 Parameters 下的 Net Radiation Rate(thermal)，单击 Show 按钮。其中散热器表面通过热辐射形式散失热量为 0.63W，约占 LED 组件总热量的 25%。可见此 LED 组件热特性仿真案例中热辐射也

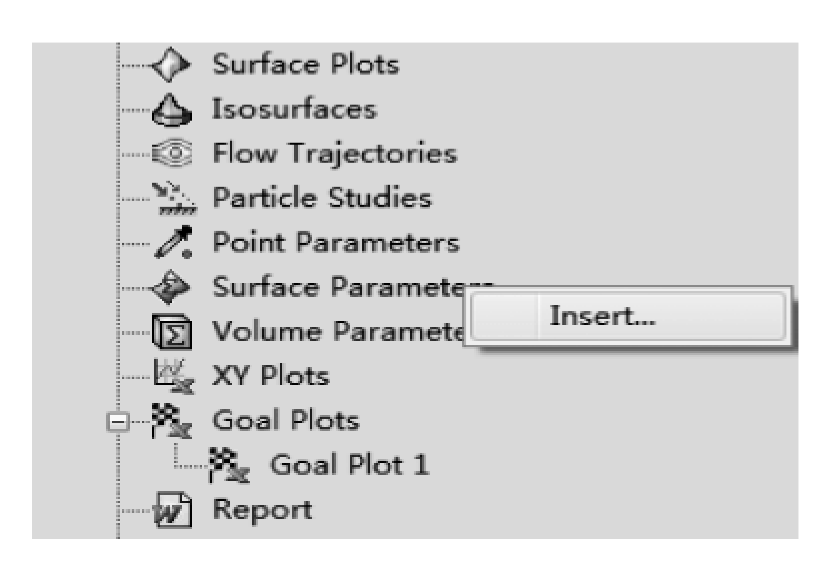


图 9-24 FloEFD 模型树

是热量散失的主要途径。单击 Surface Parameters 对话框左上角绿色√，退出 Surface Parameters 对话框。

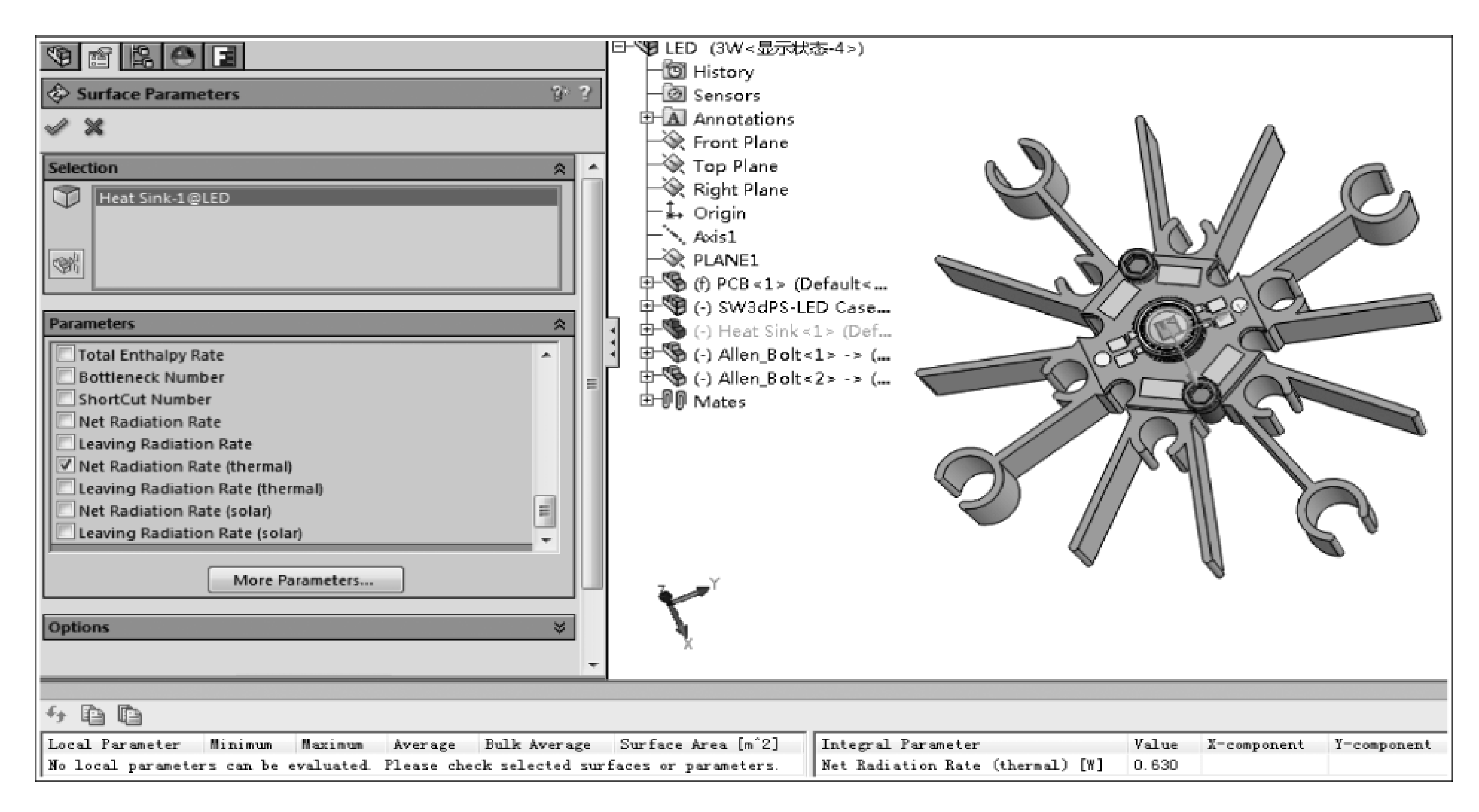


图 9-25 Surface Parameters 对话框

3. 表面云图

如图 9-26 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Surface Plots，并且选择 Insert。

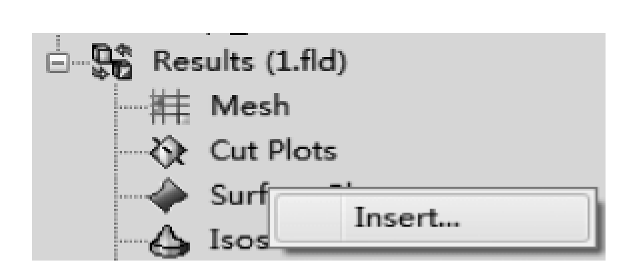


图 9-26 FloEFD 模型树

如图 9-27 所示，在弹出的 Surface Plot 对话框中，选择 Heat Sink-1@LED 作为 Selection。并且 Contours 选择 Temperature（Solid）。单击 Adjust Minimum and Maximum 图标，展开表面温度云图上下限设置选项。通过 Reset to Plot Maximum 和 Reset to Plot Minimum 设置选项，调整温度云图的上下限。将 Number of Levels 设置为 50。

图 9-28 所示为模型显示区域散热器表面的温度云图。单击 Surface Plot 对话框左上角绿色√，退出 Surface Plot 对话框。

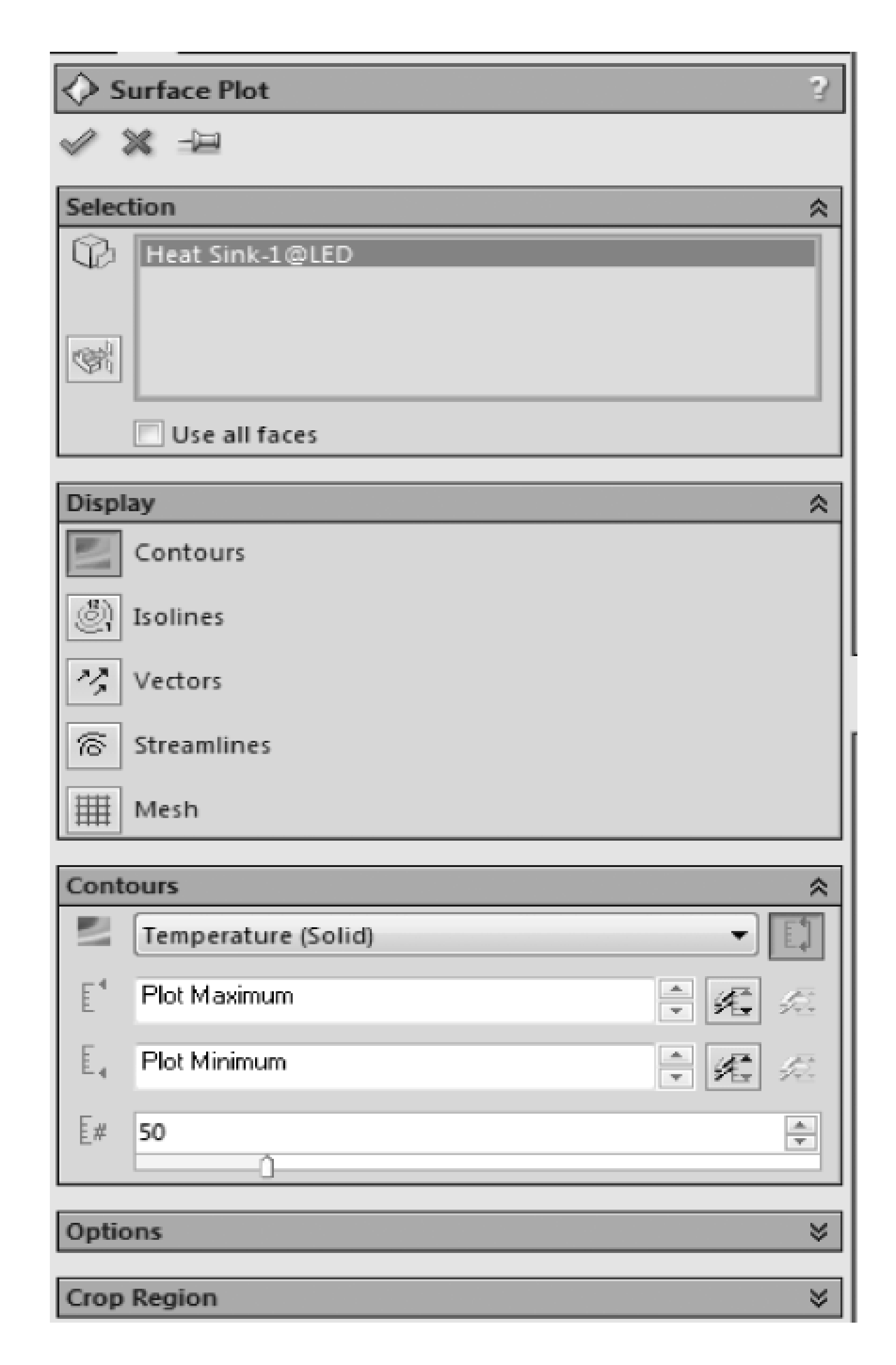


图 9-27　Surface Plot 对话框

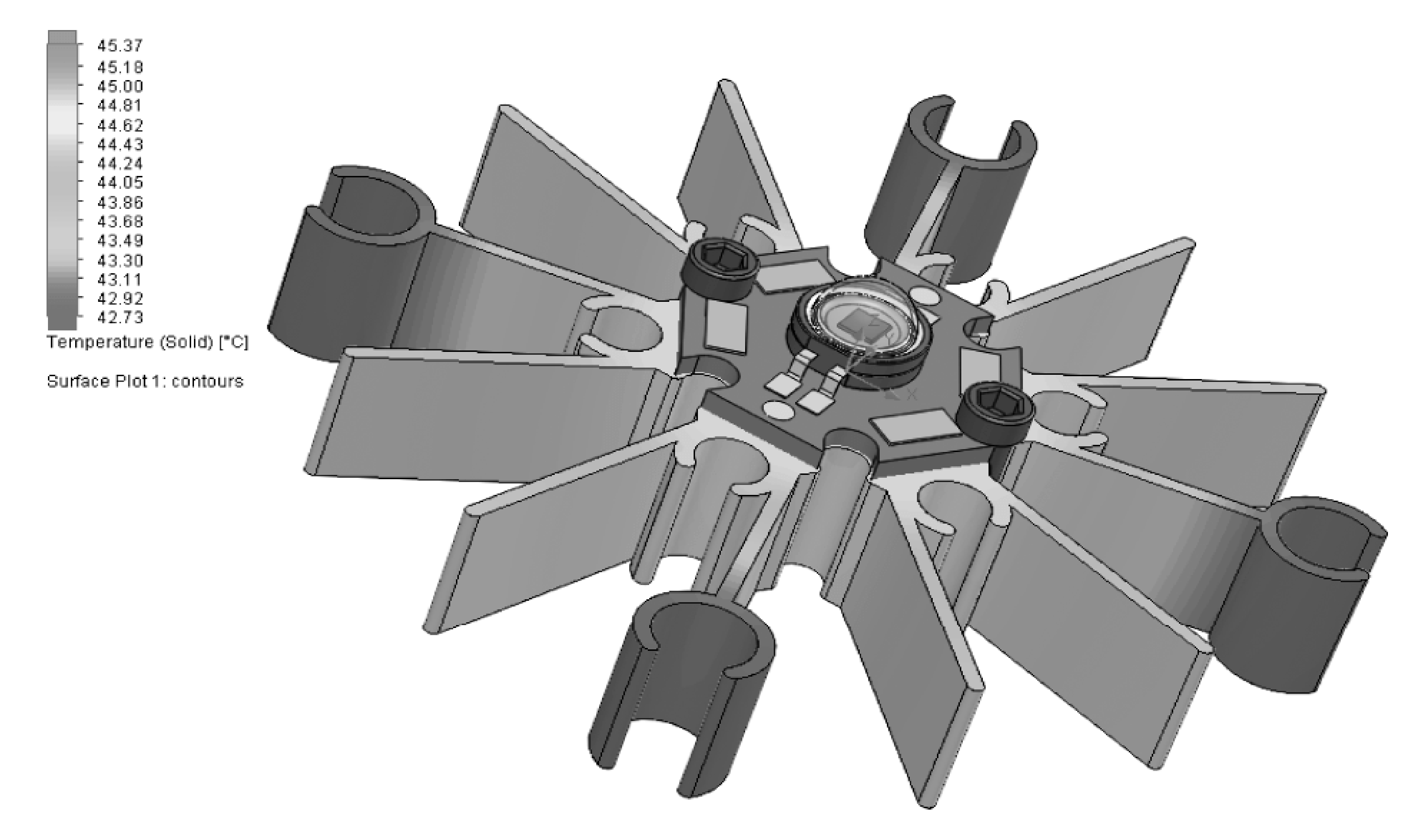


图 9-28　散热器表面温度云图

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Surface Plot1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏散热器表面温度云图。

4．切面云图

如图 9-29 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plots，并且选择 Insert。

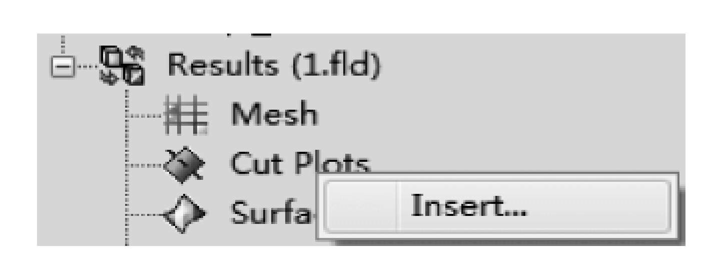


图 9-29　FloEFD 模型树

如图 9-30 所示，在弹出的 Cut Plot 对话框中，选择 Top Plane 作为 Selection。并且 Contours 选择 Temperature，将 Number of Levels 设置为 50。

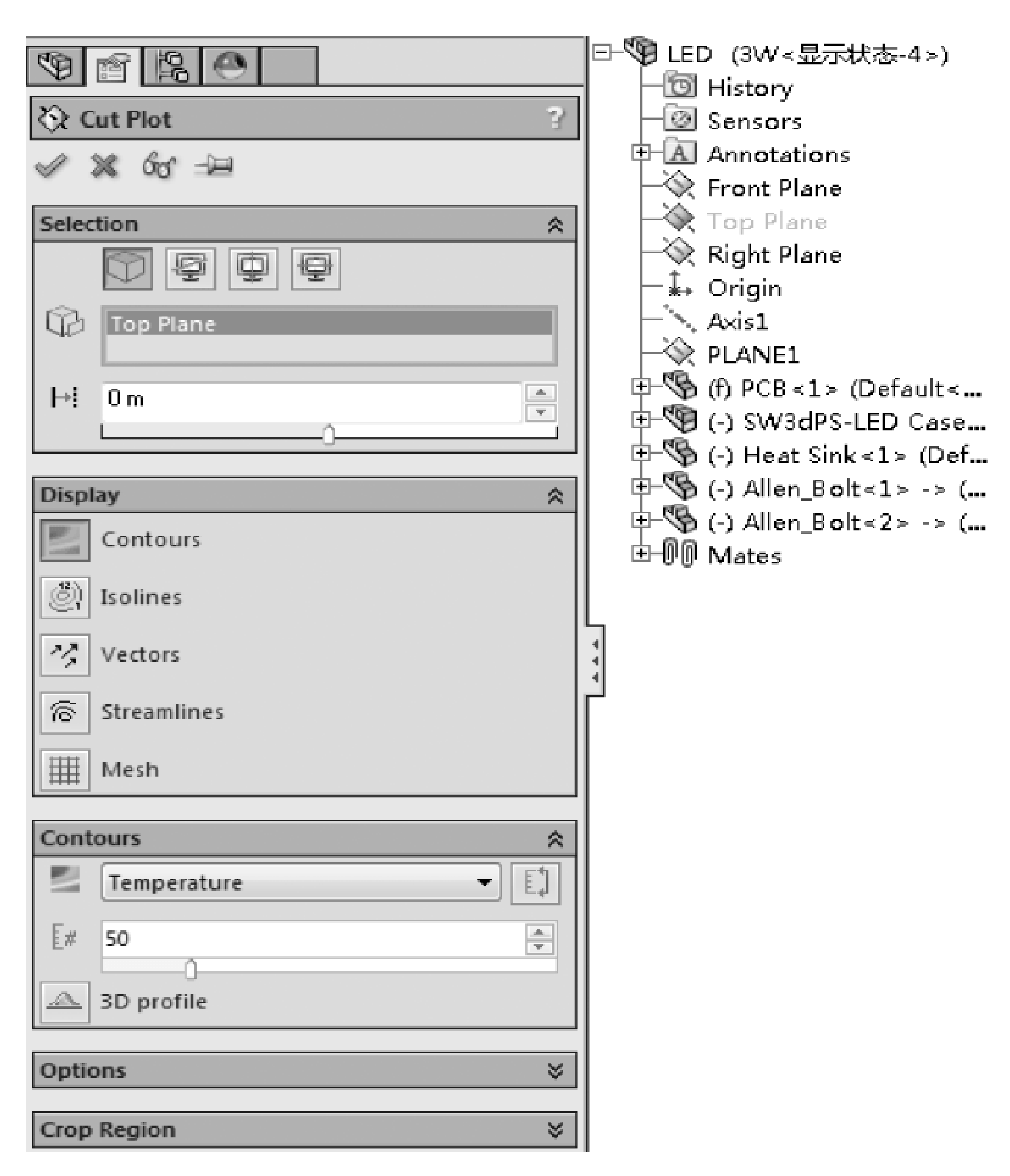


图 9-30　Cut Plot 对话框

单击 Cut Plot 对话框左上角绿色√，退出 Cut Plot 对话框。单击 View→Display→Wireframe 命令。图 9-31 所示为模型显示区域的切面温度云图。

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plot1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏切面温度云图。

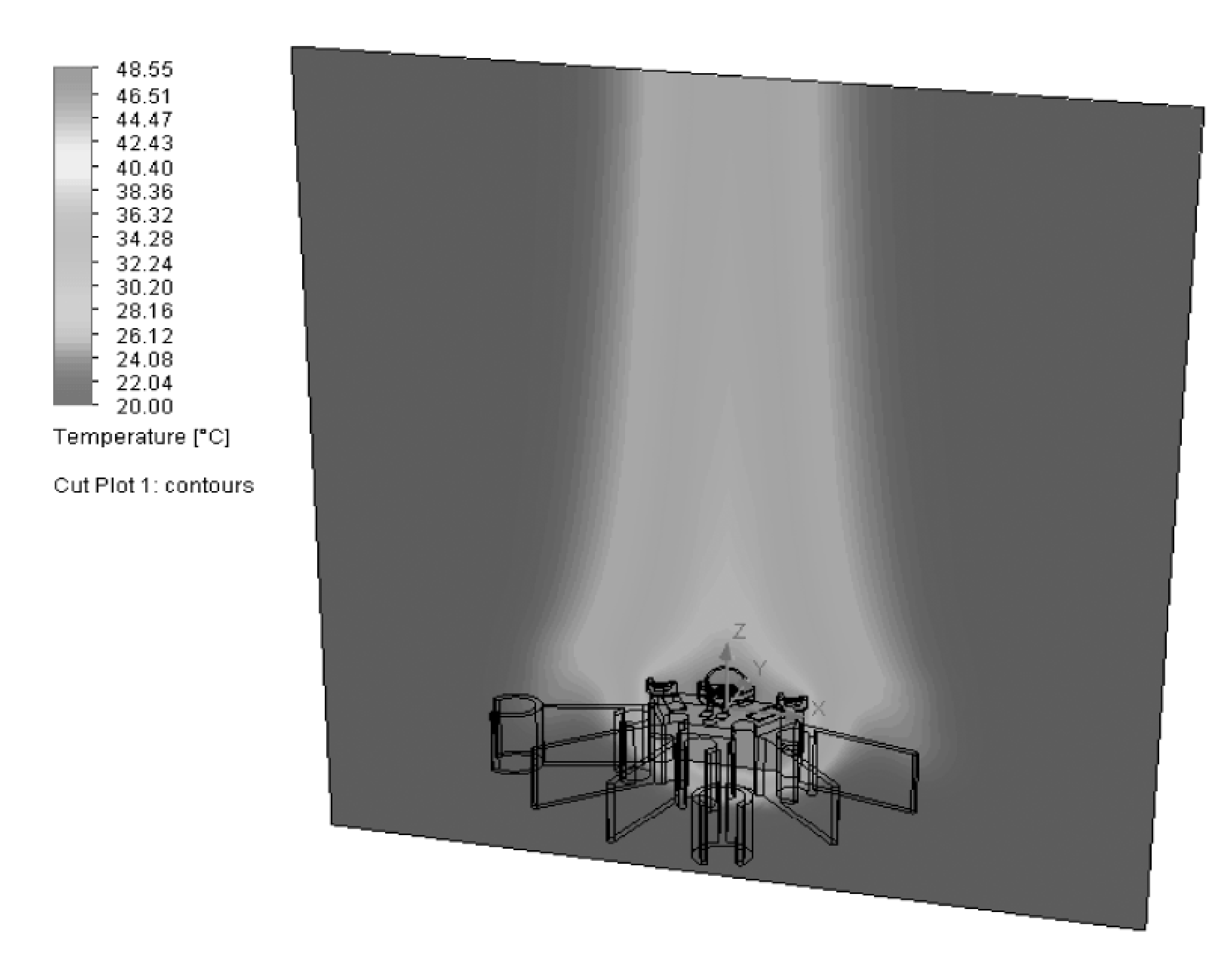


图 9-31　切面温度云图

习题

本实例中散热表面发射率(Emissivity)下降为 0.1，此时 LED 器件的平均结温上升为多少？散热器通过热辐射方式散失的热量为多少？

第10章 LED灯具热仿真分析

10.1 LED 灯具热仿真分析几何模型

图 10-1 所示为一种 LED 灯具的热仿真分析的几何模型，其中 LED 器件被安装于金属 PCB 基板(MCPCB)之上，同时金属 PCB 基板被贴覆至金属散热器上。由于灯具外壳开有通风孔，所以灯具内部散热器上的热量可以由空气带走。由于金属 PCB 基板表面温度较高，所以需要考虑其热辐射散热的影响。此外，LED 器件直接采用 T3Ster 测试数据进行热特性的建模。所以，可以精确预估 LED 器件的结温和光通量。

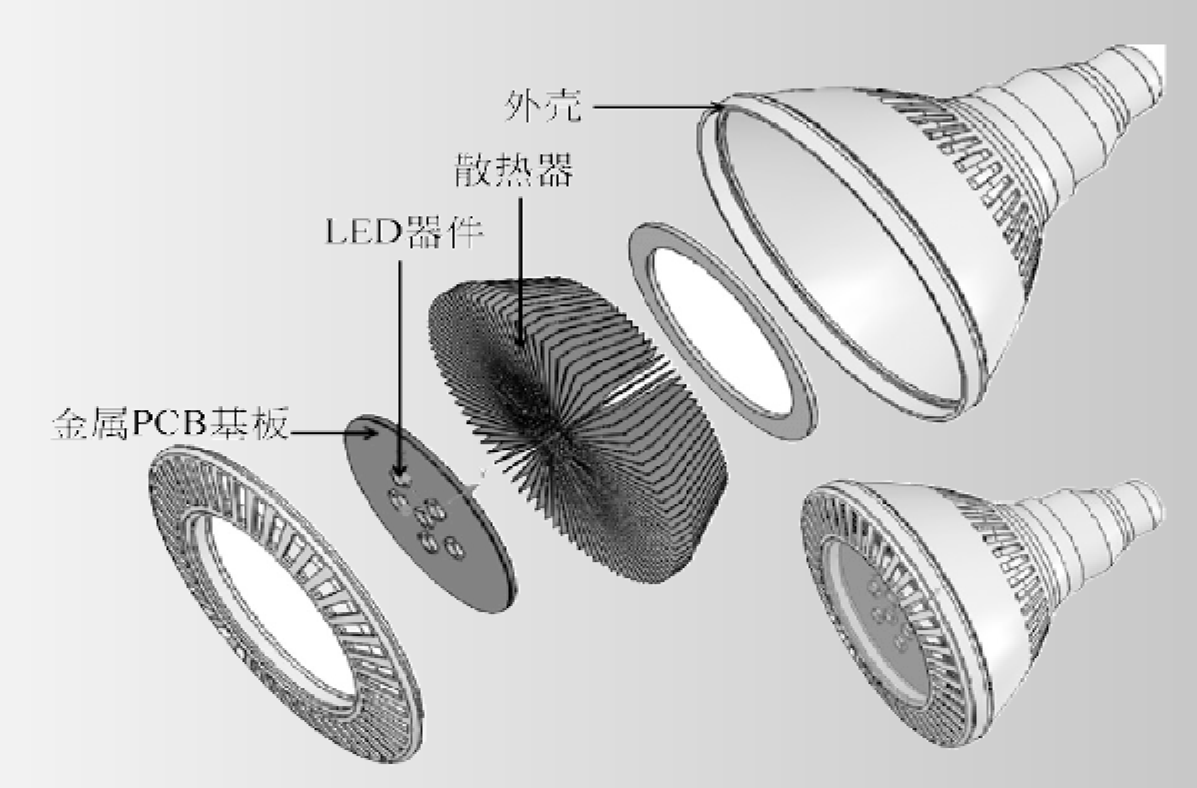


图 10-1　LED 灯具结构示意图

10.2 LED 灯具热仿真分析步骤

10.2.1 建立模型

1. 打开模型

单击 File→Open。如图 10-2 所示，在 Open 对话框中，找到 led lighting 文件夹中的 led lighting. sldasm，并单击 Open 按钮。

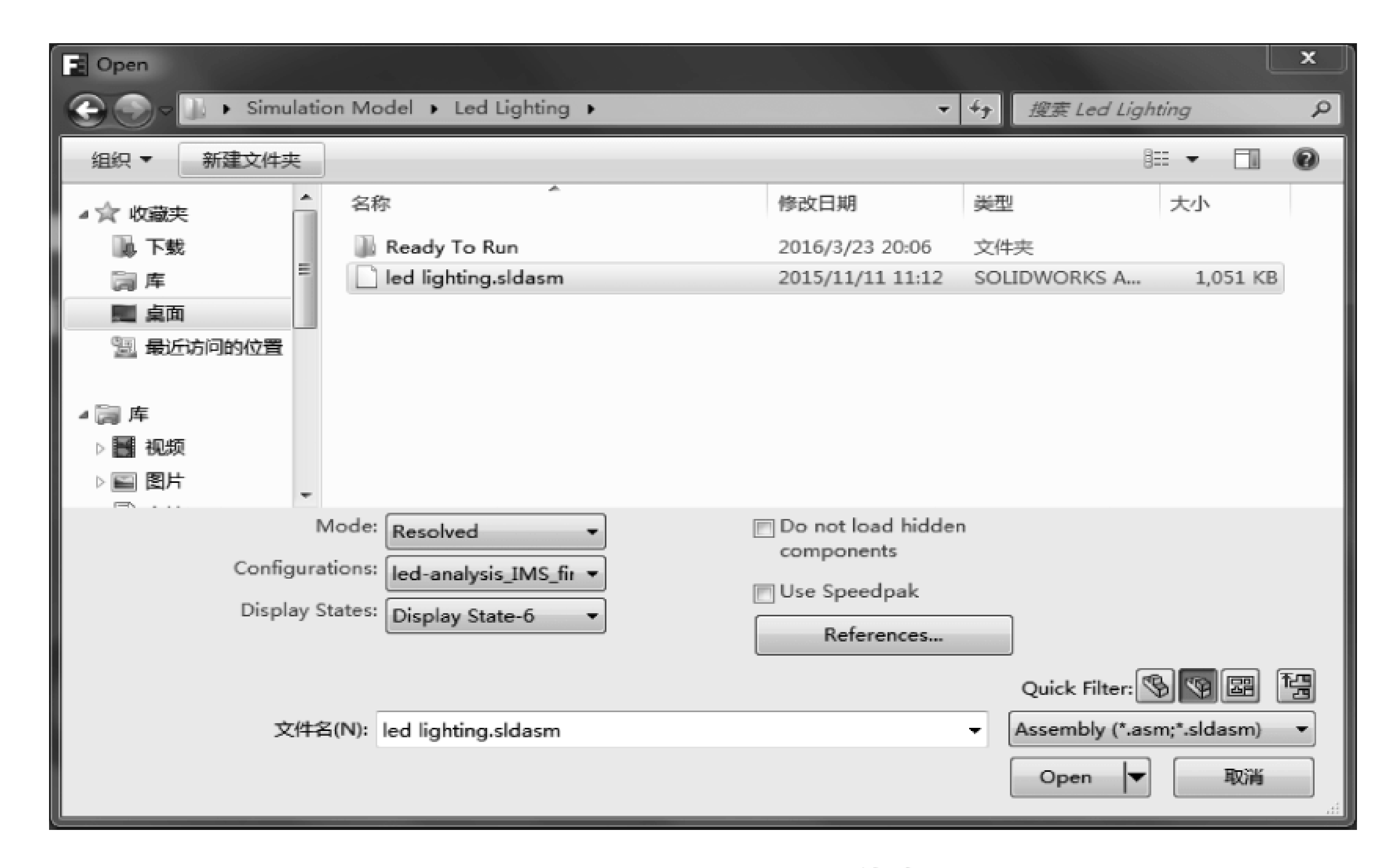


图 10-2　Led lighting 文件夹

2. 检查模型

单击 Flow Analysis→Tools→Check Geometry。如图 10-3 所示，在弹出的 Check Geometry 对话框中单击 Check 按钮，查看 LED 灯具几何模型是否通过模型检查。

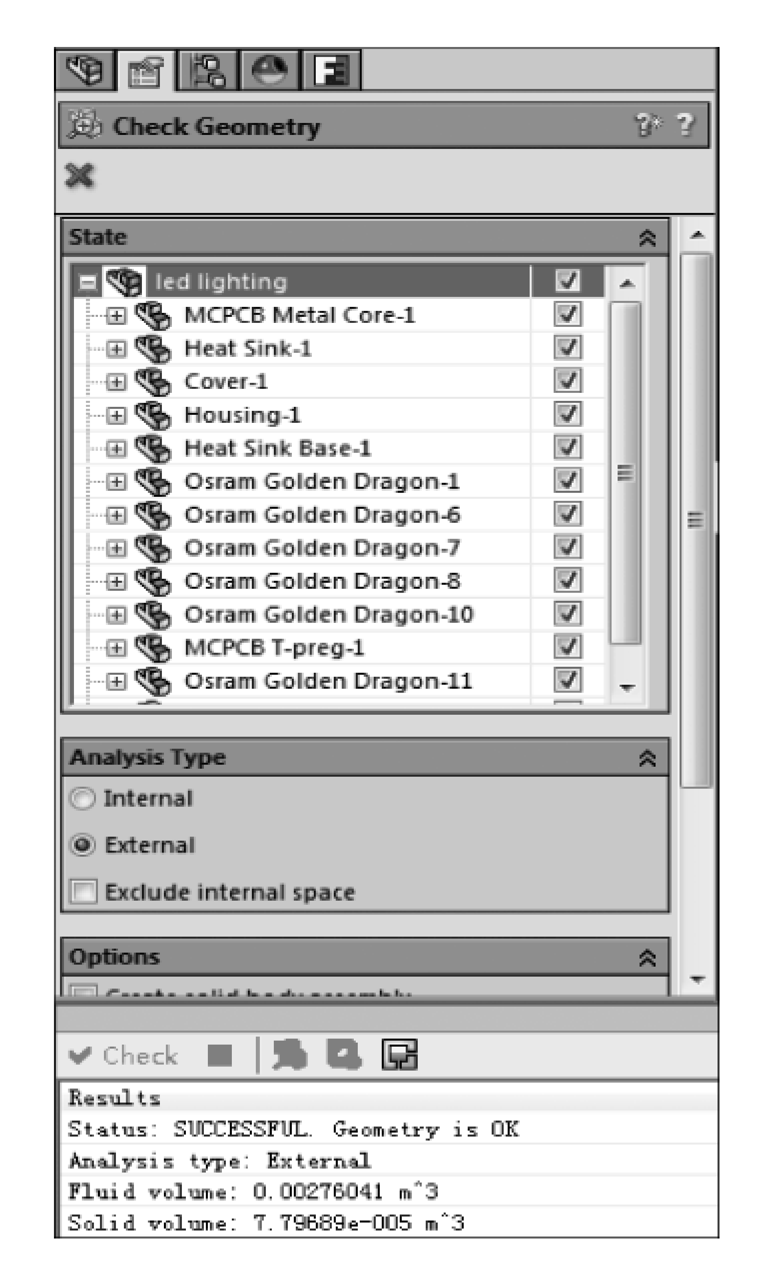


图 10-3　Check Geometry 对话框

单击 Check Geometry 对话框左上角红色×，退出 Check Geometry 对话框。

3. 创建 FloEFD 项目

单击 Flow Analysis→Project→Wizard。

如图 10-4 所示，进入 Wizard-Project Name 对话框之后，在 Project name 中输入 LED-Analysis。

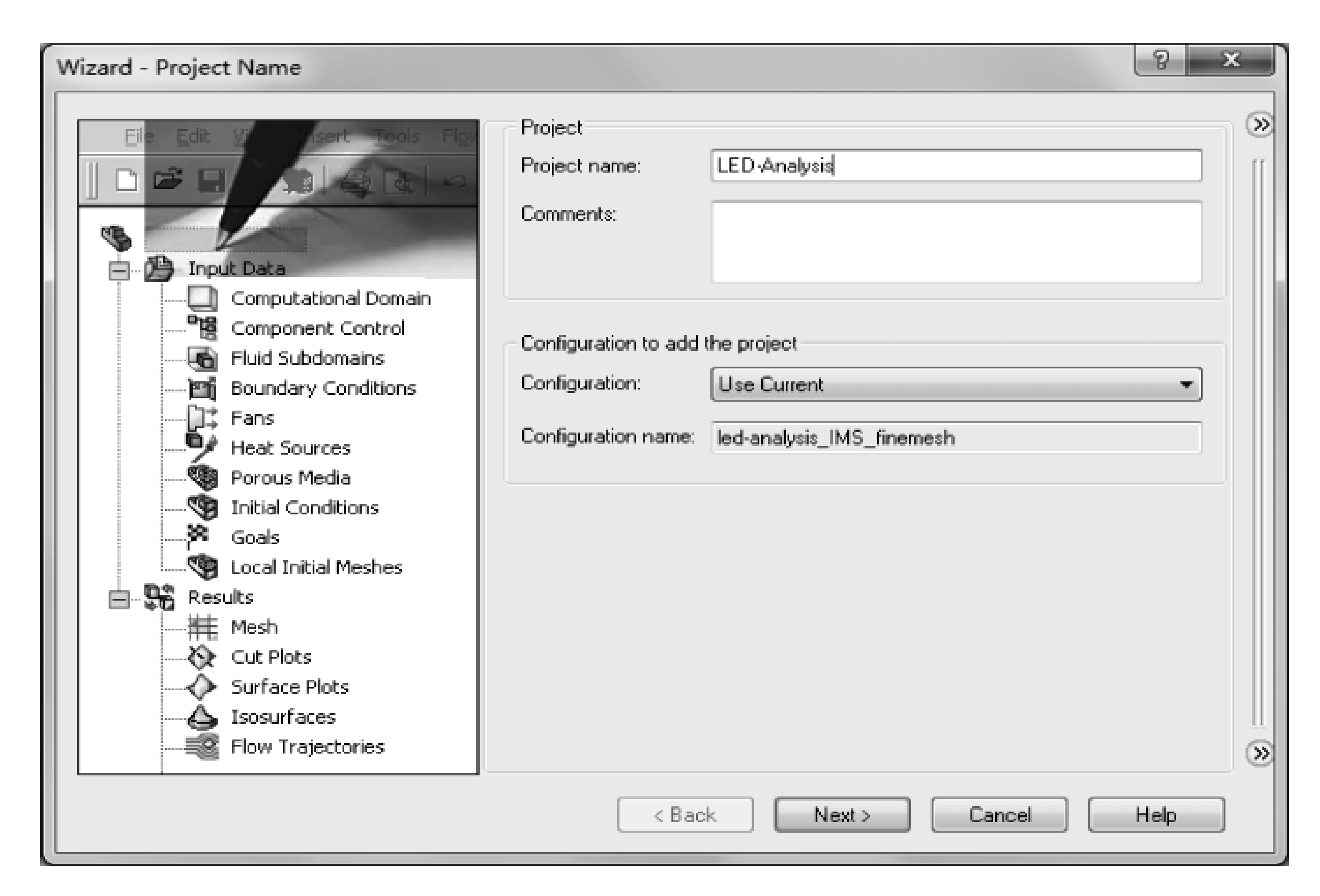


图 10-4　Wizard-Project Name 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-5 所示，进入 Wizard-Unit System 对话框之后，选择 SI（m-kg-s）作为此 FloEFD 项目的单位系统，并且将 Temperature 的单位修改为℃。

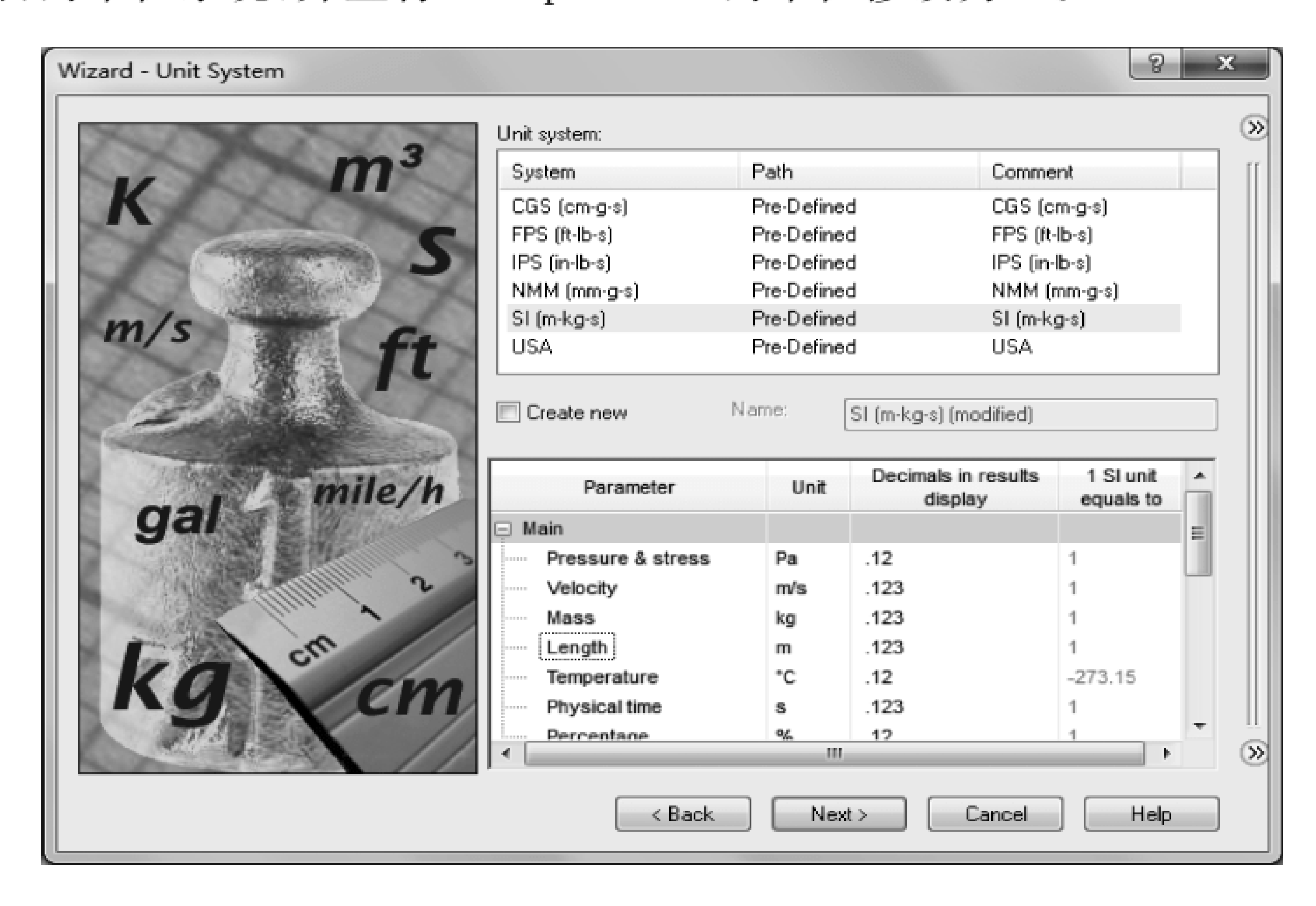


图 10-5　Wizard-Unit System 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-6 所示，进入 Wizard-Analysis Type 对话框之后，选择 External 作为 Analysis type。勾选 Heat Conduction in Solids 选项。勾选 Radiation 选项，并且如图 10-6 所示设置 Radiation 参数。勾选 Gravity 选项，将 Y component 设置为 $-9.81\,m/s^2$。

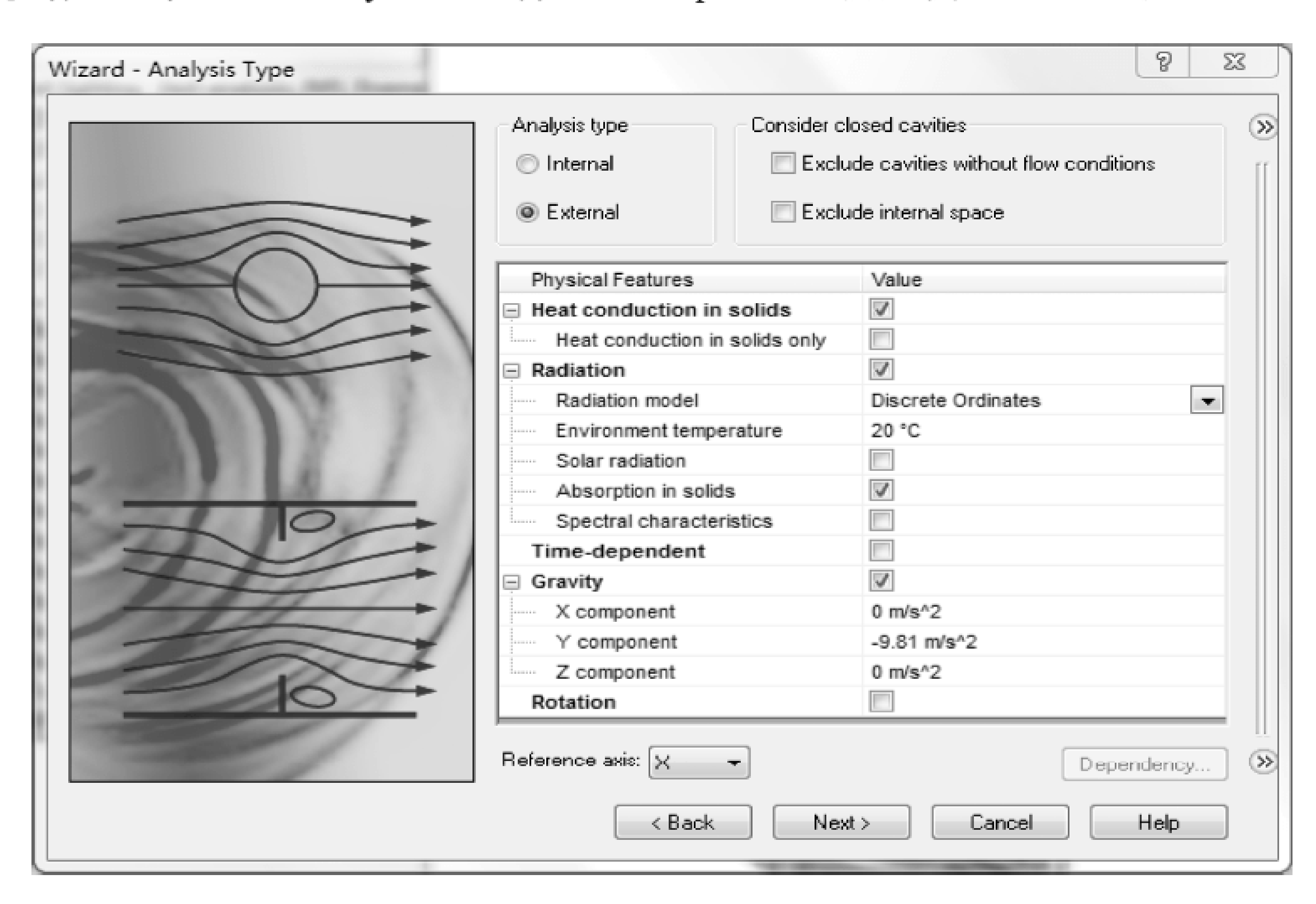


图 10-6　Wizard-analysis Type 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-7 所示，进入 Wizard-Default Fluid 对话框之后，展开 Gases→Pre-Defined，选择 Air 作为项目的默认流体，并且单击 Add 按钮。

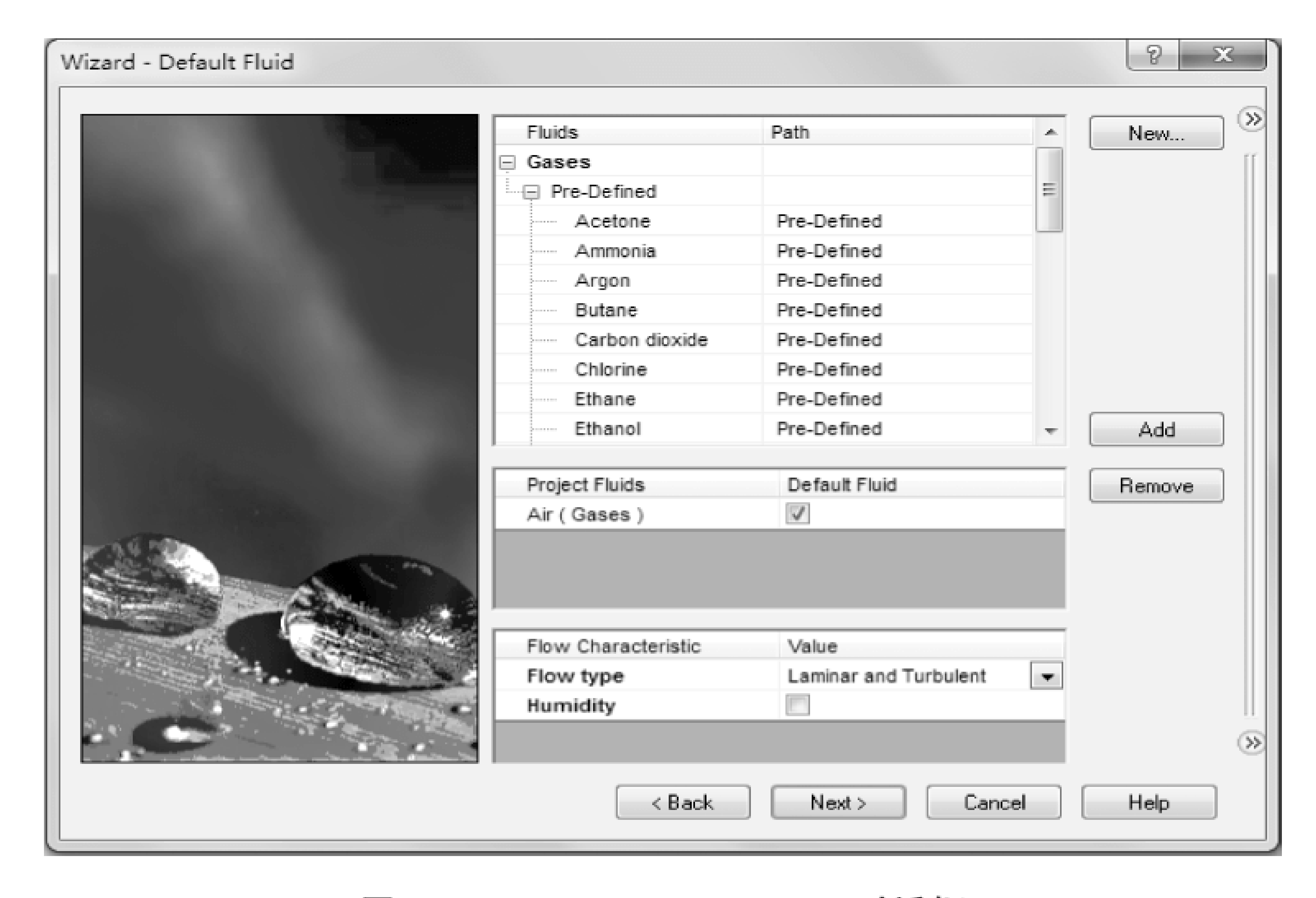


图 10-7　Wizard-Default Fluid 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-8 所示，进入 Wizard-Default Solid 对话框之后，展开 Pre-Defined→Alloys，选择 Aluminum 5052 作为项目默认固体。

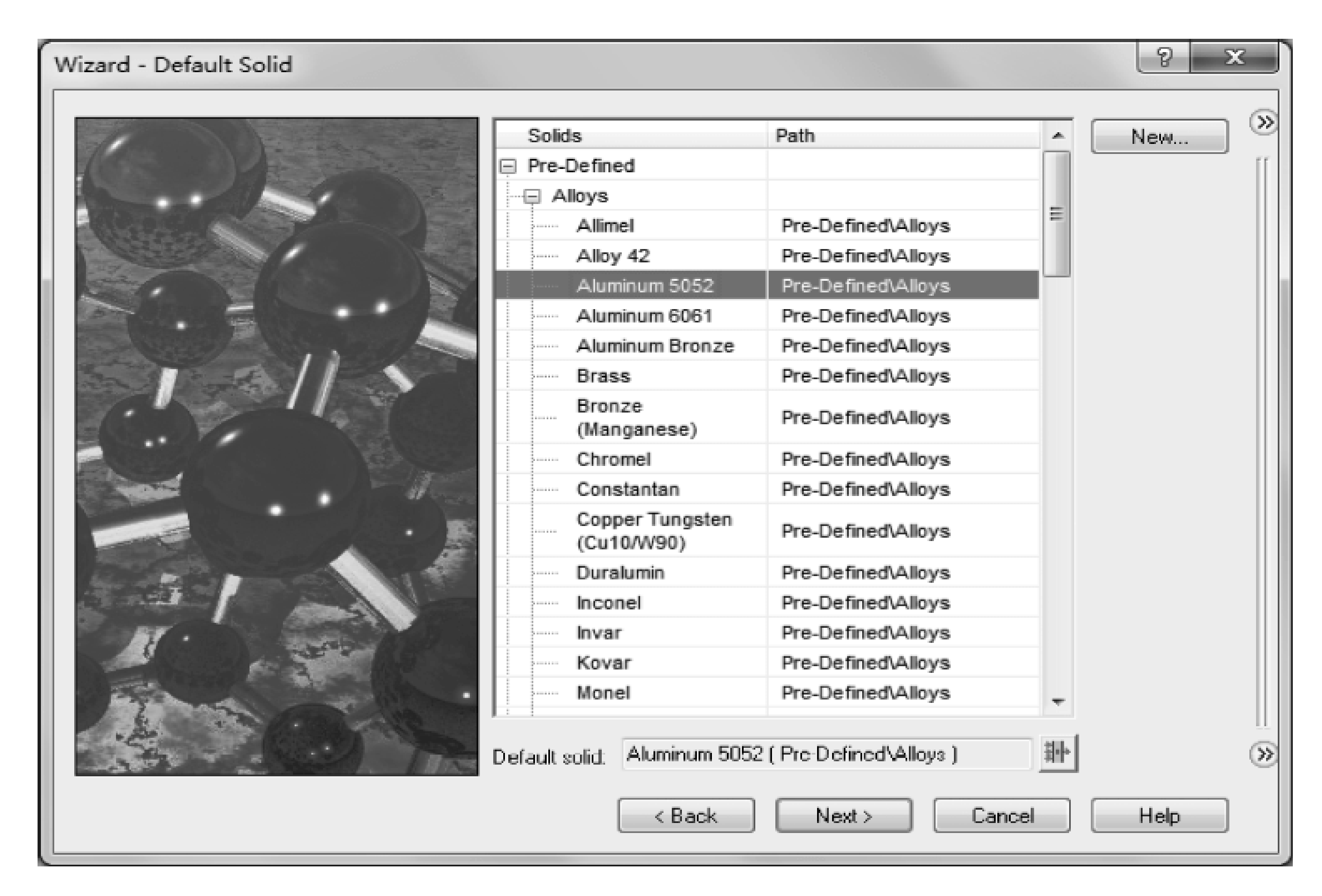


图 10-8　Wizard-Default Solid 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-9 所示，进入 Wizard-Wall Conditions 对话框之后，选择 Pre-Defined→Real Surface→Aluminum→polished 作为 Default wall radiative surface。

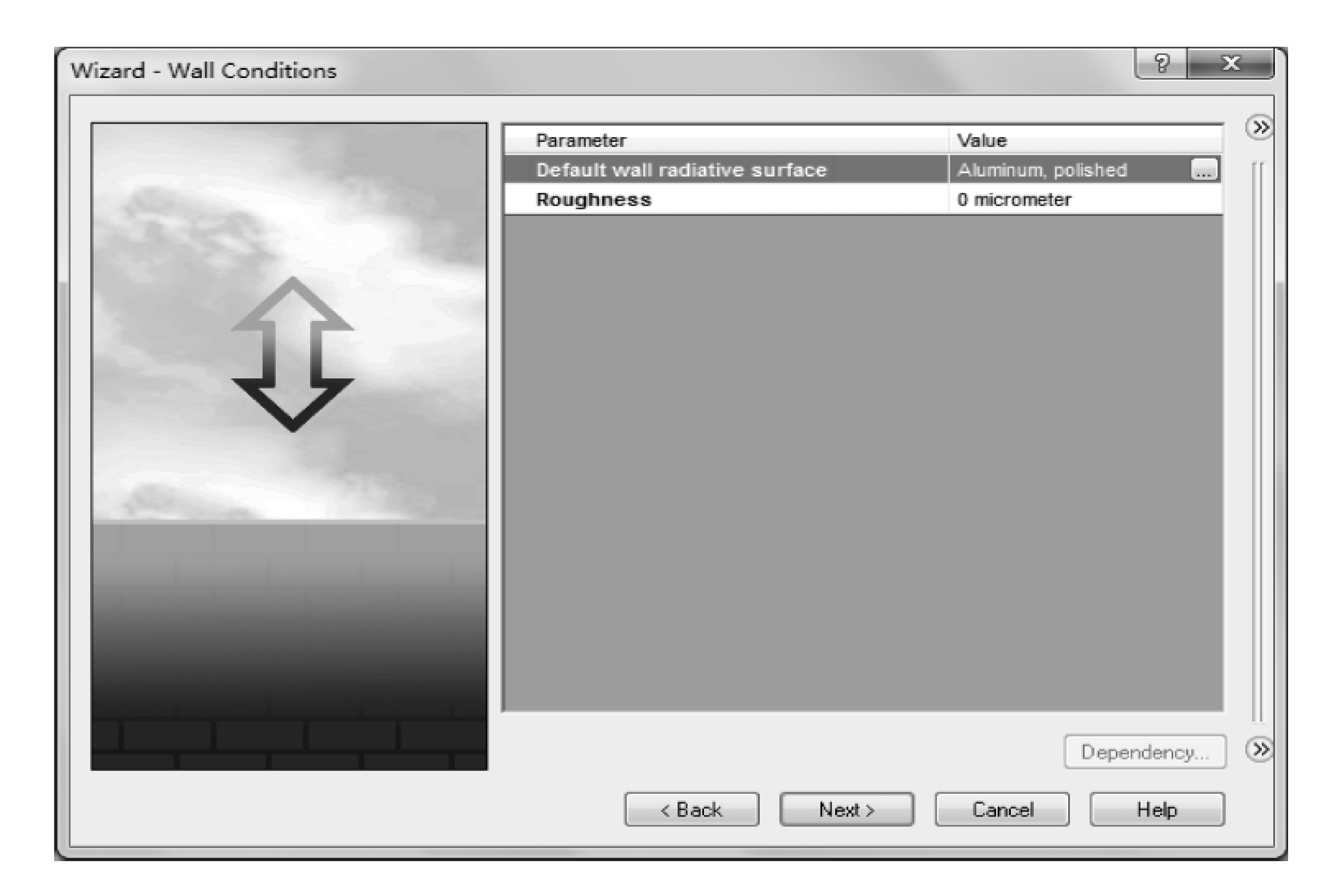


图 10-9　Wizard-Wall Conditions 对话框

单击 Next 按钮。

如图 10-10 所示，进入 Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框之后，展开 Thermodynamics Parameters，将其 Temperature 设置为 20℃。展开 Solid Parameters，将其 Initial solid temperature 设置为 20℃。

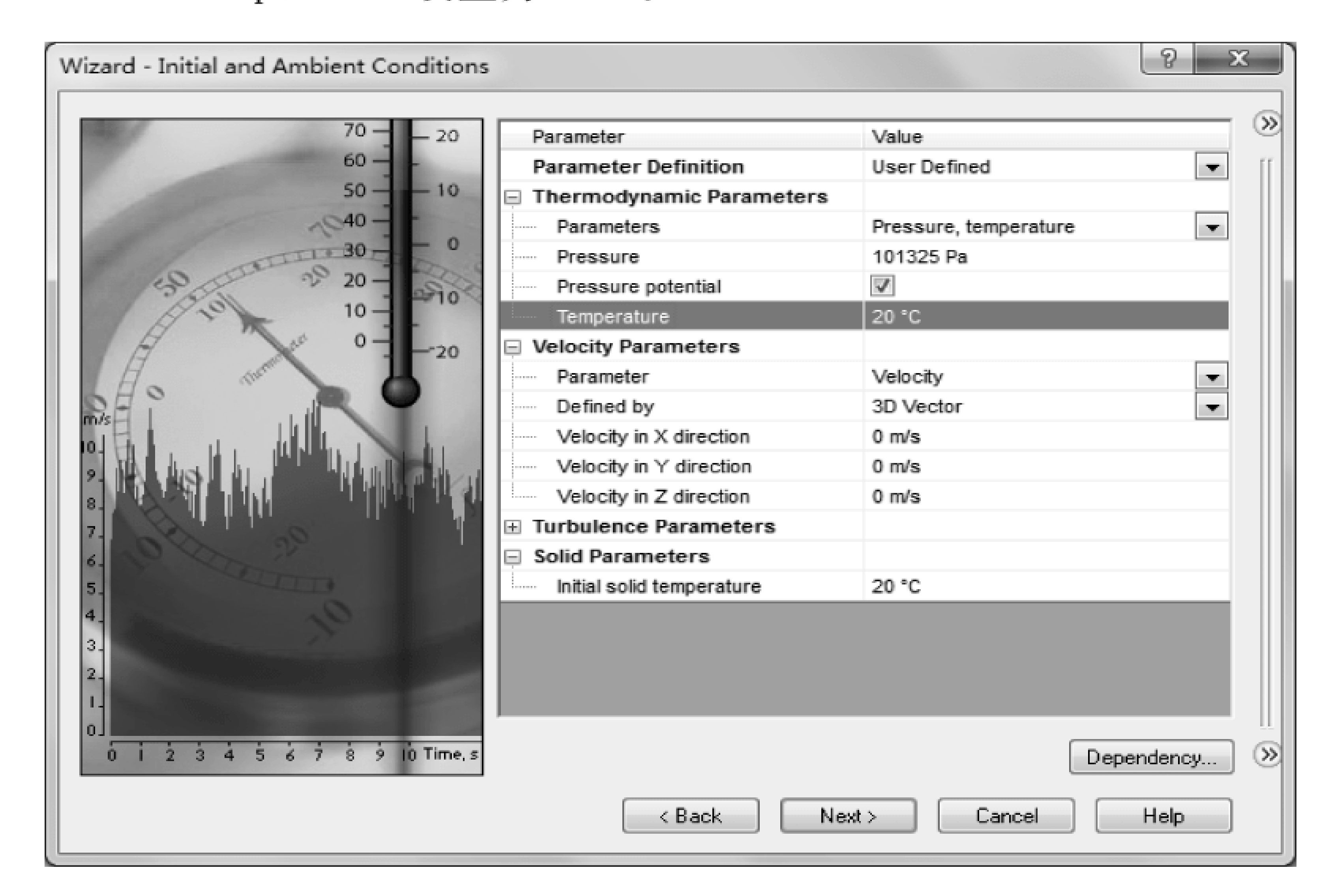


图 10-10　Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框

单击 Finish 按钮。

10.2.2　求解域调整

如图 10-11 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Computational Domain，选择 Edit Definition。

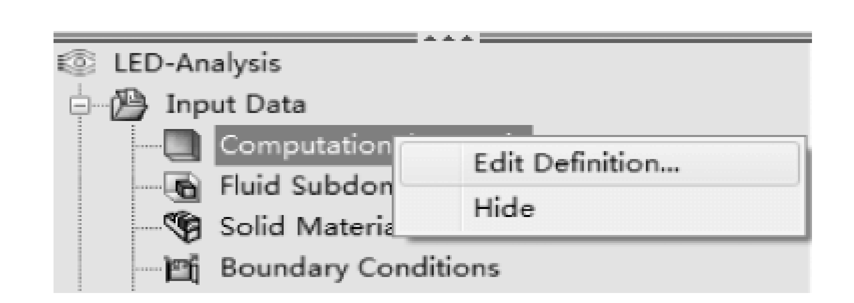


图 10-11　FloEFD 模型树中的 Computational Domain

进入 Computational Domain 对话框之后，如图 10-12 所示，设置 Size and Conditions。

10.2.3　参数设置

1. 定义 LED

单击 Flow Analysis→Insert→LED。如图 10-13 所示，在弹出的 LED 对话框中，选

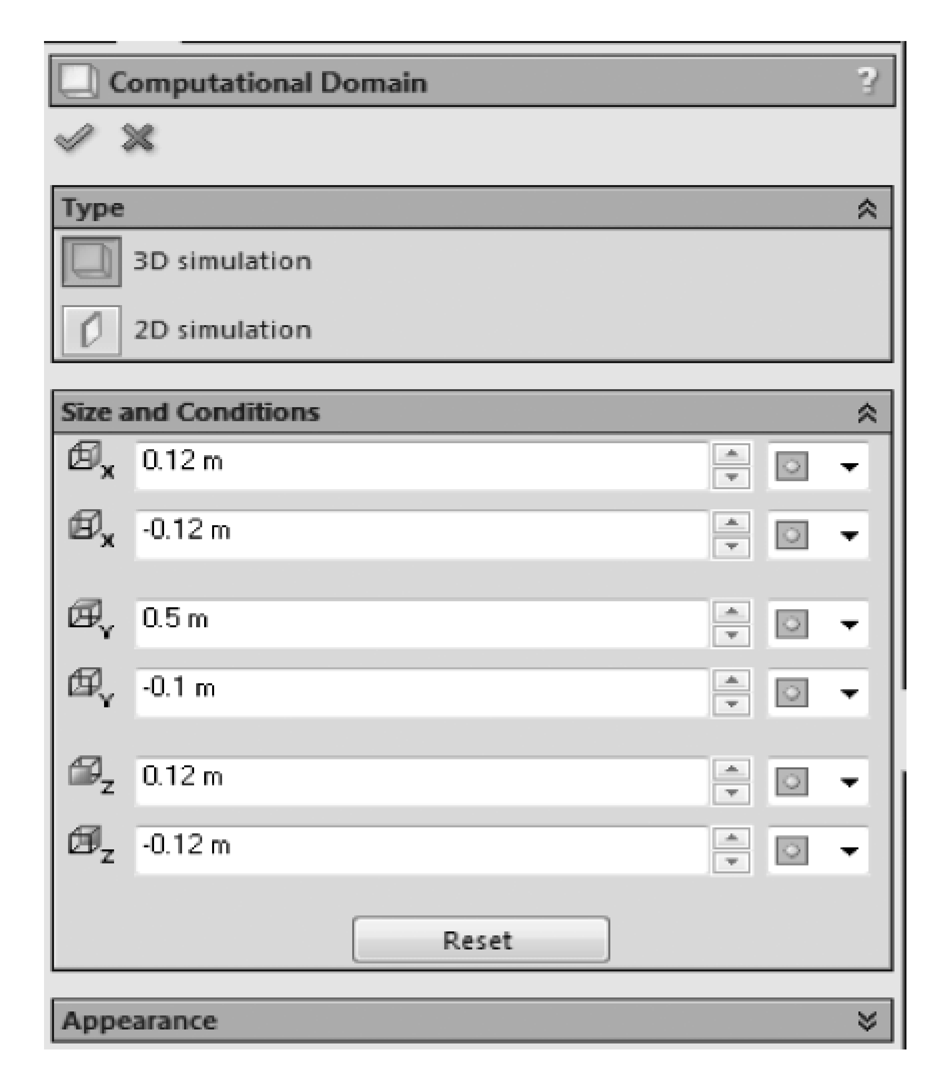


图 10-12　Computational Domain 对话框

择 Face < 2 >@ Osram Golden Dragon-1 作为 LED 的顶面，选择 Face < 1 >@ Osram Golden Dragon-1 作为 LED 的底面。

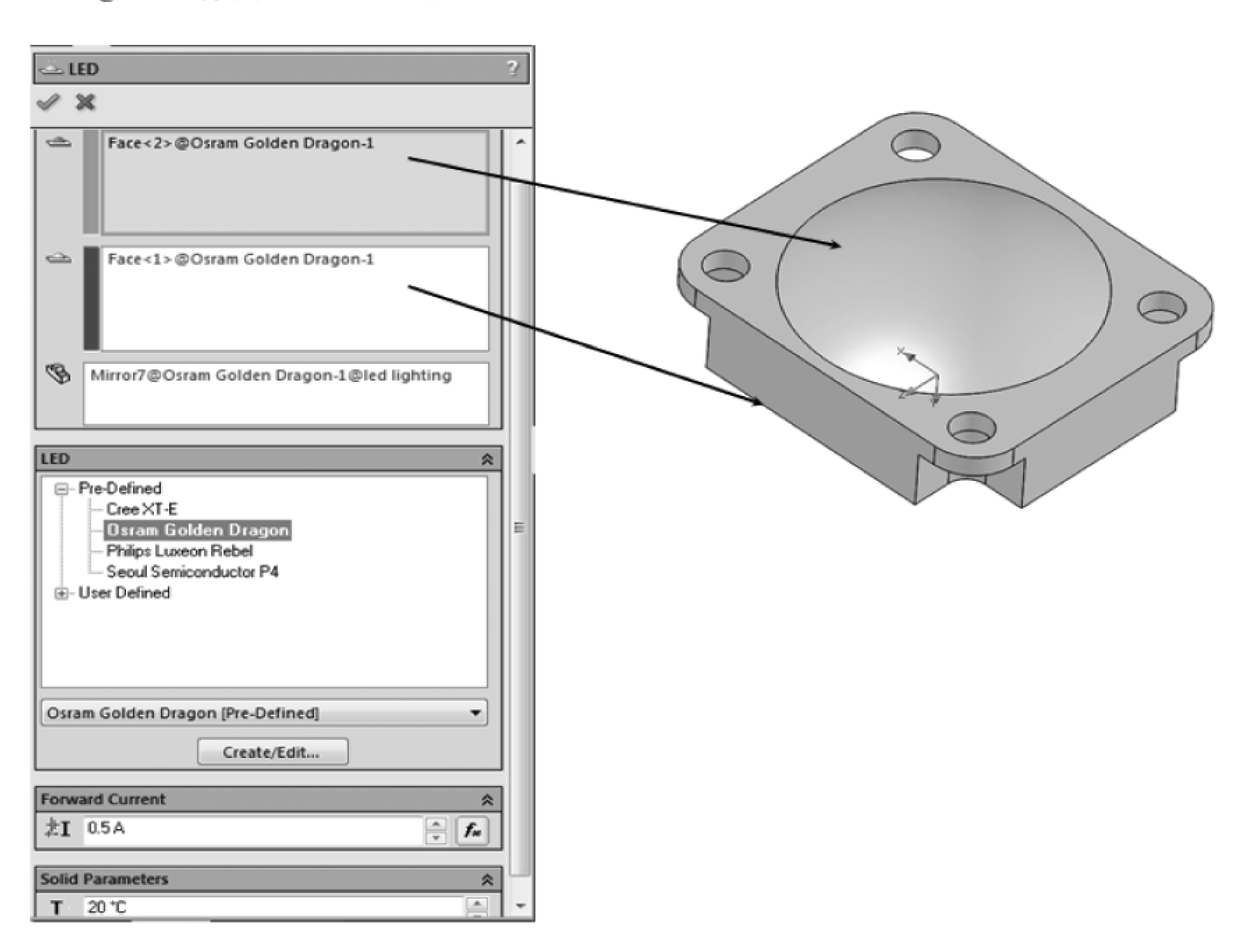


图 10-13　LED 对话框

选择 Osram Golden Dragon 作为 LED 的类型。

将 Forward Current 设置为 0.5A。

单击 LED 对话框左上角√，退出 LED 对话框。

如图 10-14 所示，右击 FloEFD 模型树中的 LED 1，在弹出的菜单中选择 Copy to Component Instance。

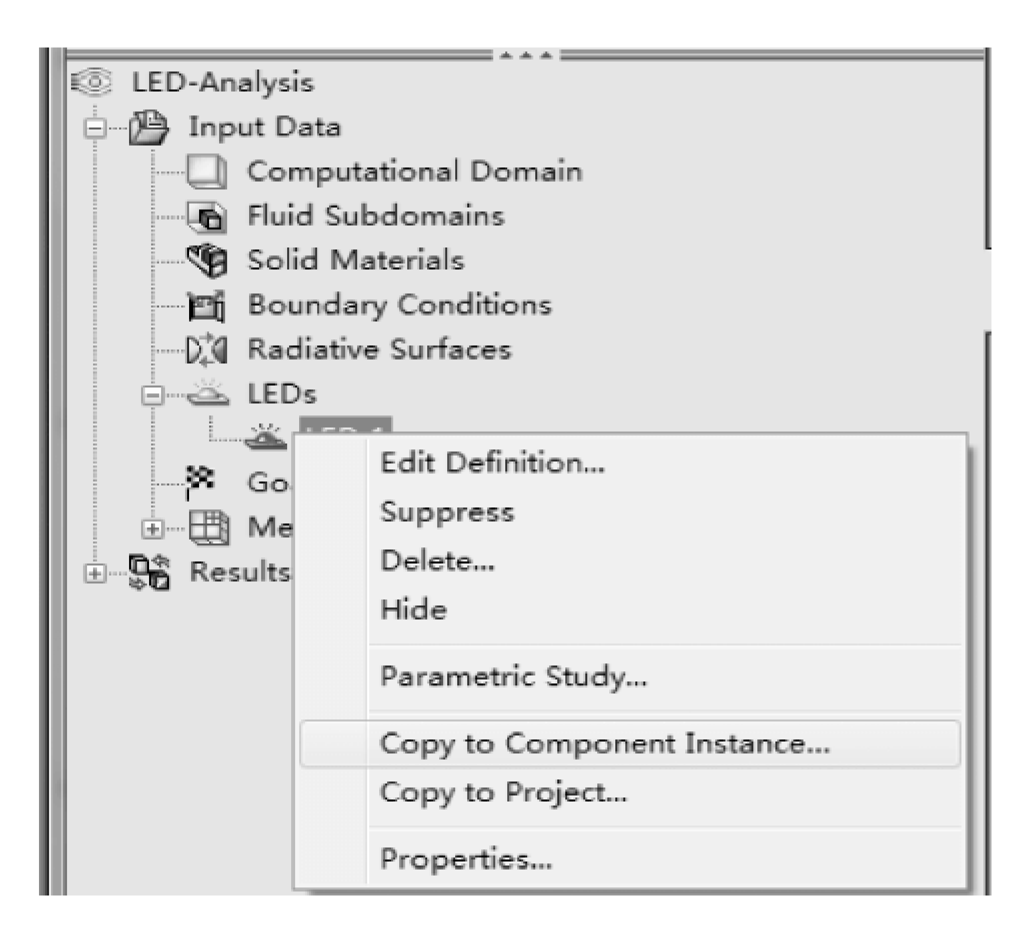


图 10-14　FloEFD 模型树

如图 10-15 所示，在弹出的 Copy to Component Instance 对话框中，单击对话框左上角√，退出 Copy to Component Instance 对话框。

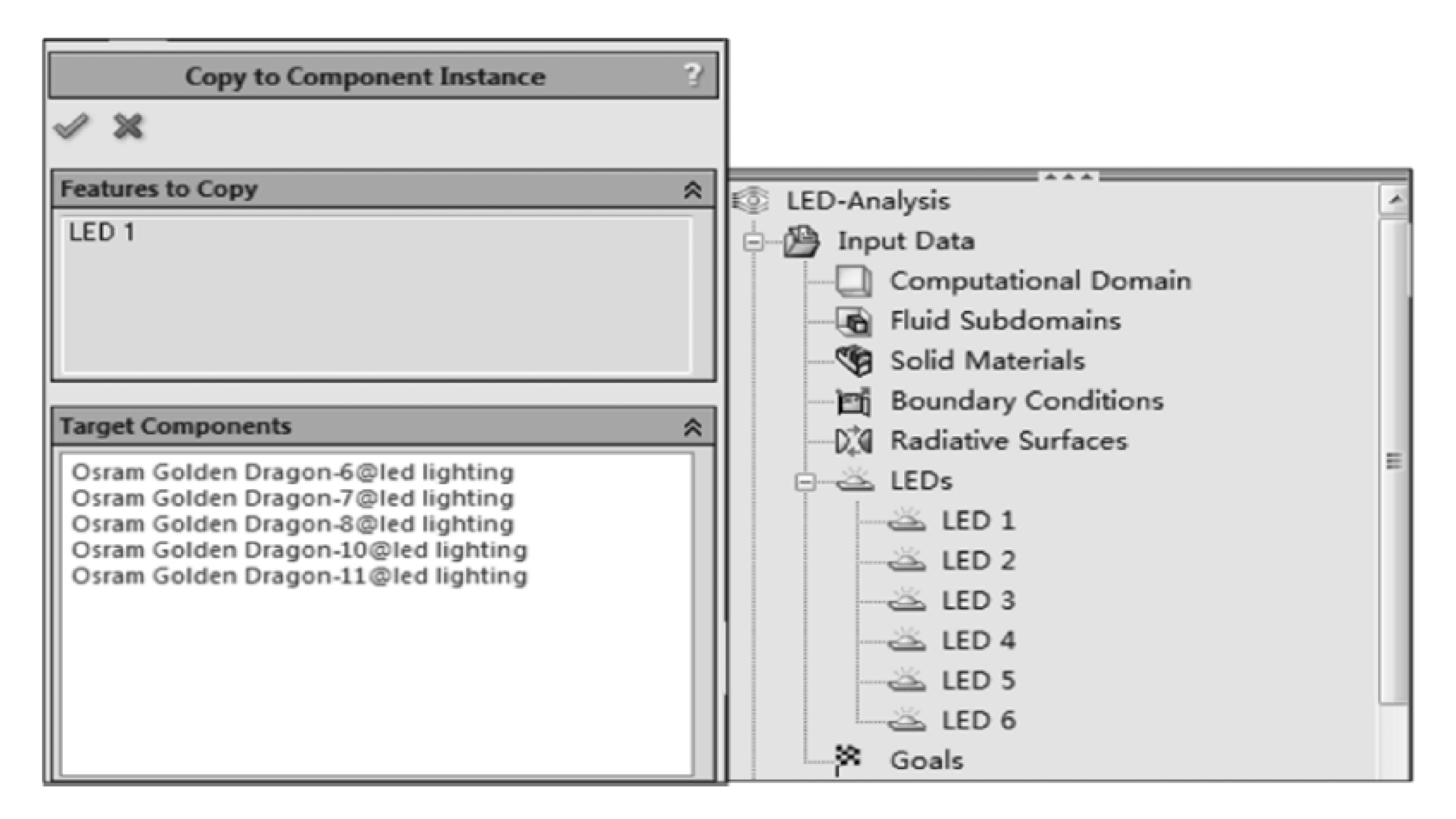


图 10-15　Copy to Component Instance 对话框

2. 创建固体材料

单击 Flow Analysis-Tools-Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 对话框中，选择 Database 设置树下的 Materials→Solids→User Defined。

单击 File→New→New Item，在弹出的 Item Properties 选项卡中，双击空白单元格，如图 10-16 所示，设置 ABS Polymer 相应的特性值。

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	ABS Polymer
Comments	
Density	890 kg/m^3
Specific heat	1900 J/(kg*K)
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	0.15 W/(m*K)
Electrical conductivity	Dielectric
Radiation properties	☐
⊟ Melting temperature	☑
Temperature	438.15 K

图 10-16　ABS Polymer 的特性值

单击 File→Save。

单击 File→New→New Item，在弹出的 Item Properties 选项卡中，双击空白单元格，如图 10-17 所示，设置 T-preg 相应的特性值。

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	T-preg
Comments	
Density	1600 kg/m^3
Specific heat	1120 J/(kg*K)
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	2.2 W/(m*K)
Electrical conductivity	Dielectric
Radiation properties	☐
⊟ Melting temperature	☑
Temperature	438.15 K

图 10-17　T-preg 的特性值

单击 File→Save。

单击 File→Exit。

3. 定义固体材料

右击 FloEFD 模型树中的 Solid Materials，在弹出的菜单中选择 Insert Solid Material。

如图 10-18 所示，在弹出的 Solid Material 对话框中，选择几何模型树中 Cover-1@led lighting 和 Housing-1@led lighting 作为 Selection。

选择 User Defined→ABS Polymer 作为 Solid。单击 Solid Material 对话框左上角绿色√，退出 Solid Material 对话框，完成 ABS Polymer 材料定义。

采用以上相同方法，将 Heat Sink < 1 >的材料定义为 Pre-Defined→Alloys→

Aluminum 6061。

采用以上相同方法，将 glass<1>的材料定义为 Pre-Defined→Glasses and Minerals→Quartz glass。

采用以上相同方法，将 MCPCB T-preg<1>的材料定义为 User Defined→T-preg。

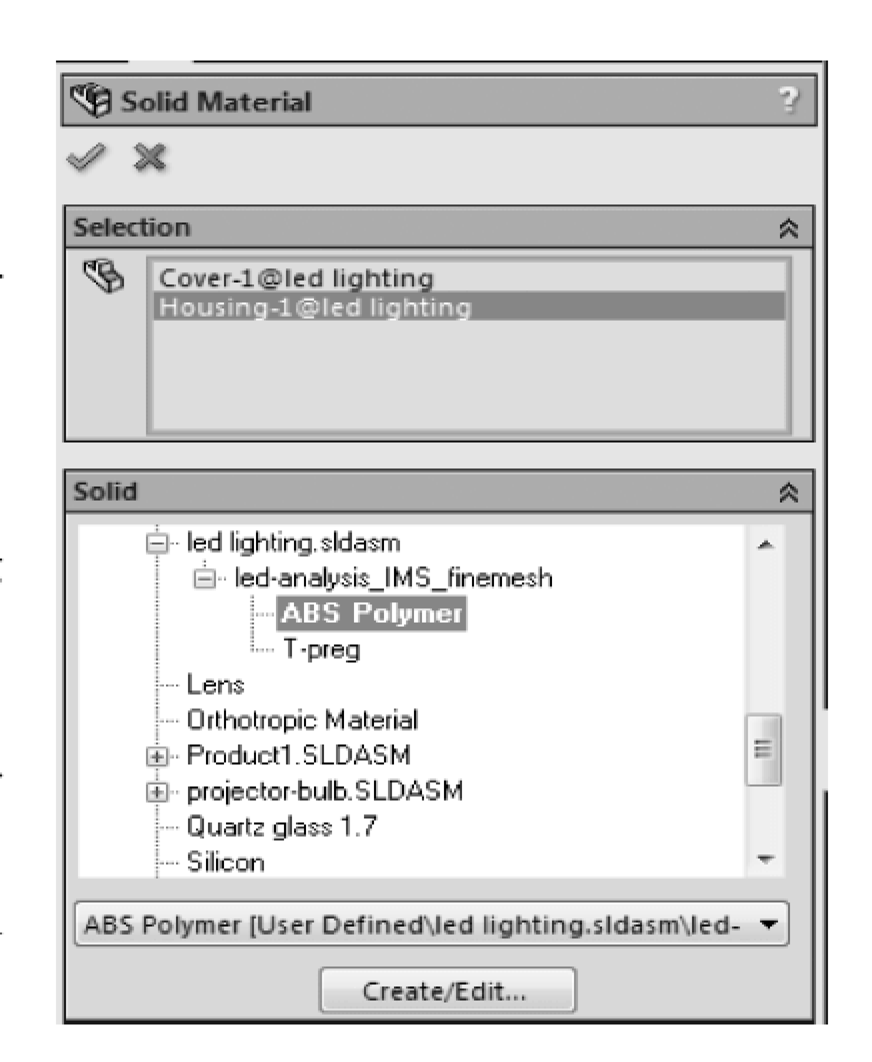


图 10-18　Solid Material 对话框

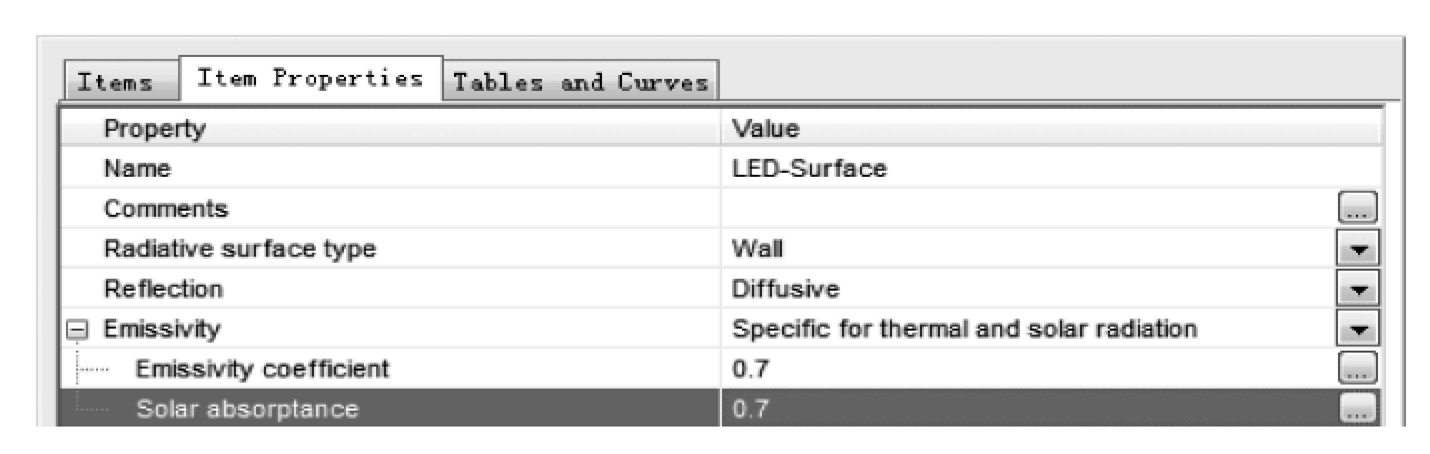
4. 创建辐射表面

单击 Flow Analysis→Tools→Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 对话框中，选择 Database 设置树下的 Radiative Surface→User Defined。

单击 File→New→New Item，在弹出的 Item Properties 选项卡中，双击空白单元格，如图 10-19 所示，设置 LED-Surface 相应的特性值。

单击 File→Save。



Property	Value
Name	LED-Surface
Comments	
Radiative surface type	Wall
Reflection	Diffusive
Emissivity	Specific for thermal and solar radiation
Emissivity coefficient	0.7
Solar absorptance	0.7

图 10-19　LED-Surface 特性值

单击 File→Exit。

5. 定义辐射表面

右击 FloEFD 模型树中的 Radiative Surface，在弹出的菜单中选择 Insert Radiative Surface。

如图 10-20 所示，在弹出的 Radiative Surface 对话框中，选择几何模型树中 6 颗 LED 的上表面 Face<2>@Osram Golden Dragon-6、Face<2>@Osram Golden Dragon-11、Face<2>@Osram Golden Dragon-1、Face<2>@Osram GoldenDragon-10、Face<2>@Osram GoldenDragon-8、Face<2>@Osram GoldenDragon-7 作为 Selection，在 Type 中选择 User Defined-LED-Surface。单击 Radiative Surface 对话框左上角绿色√，退出 Radiative Surface 对话框，完成 Radiative Surface 1 定义。

右击 FloEFD 模型树中的 Radiative Surface，在弹出的菜单中选择 Insert Radiative Surface。

如图 10-21 所示，在弹出的 Radiative Surface 对话框中，选择几何模型树中 Face<1>@MCPCB T-preg-1 作为 Selection，在 Type 中选择 Pre-Defined→Real Surfaces→Shellac，

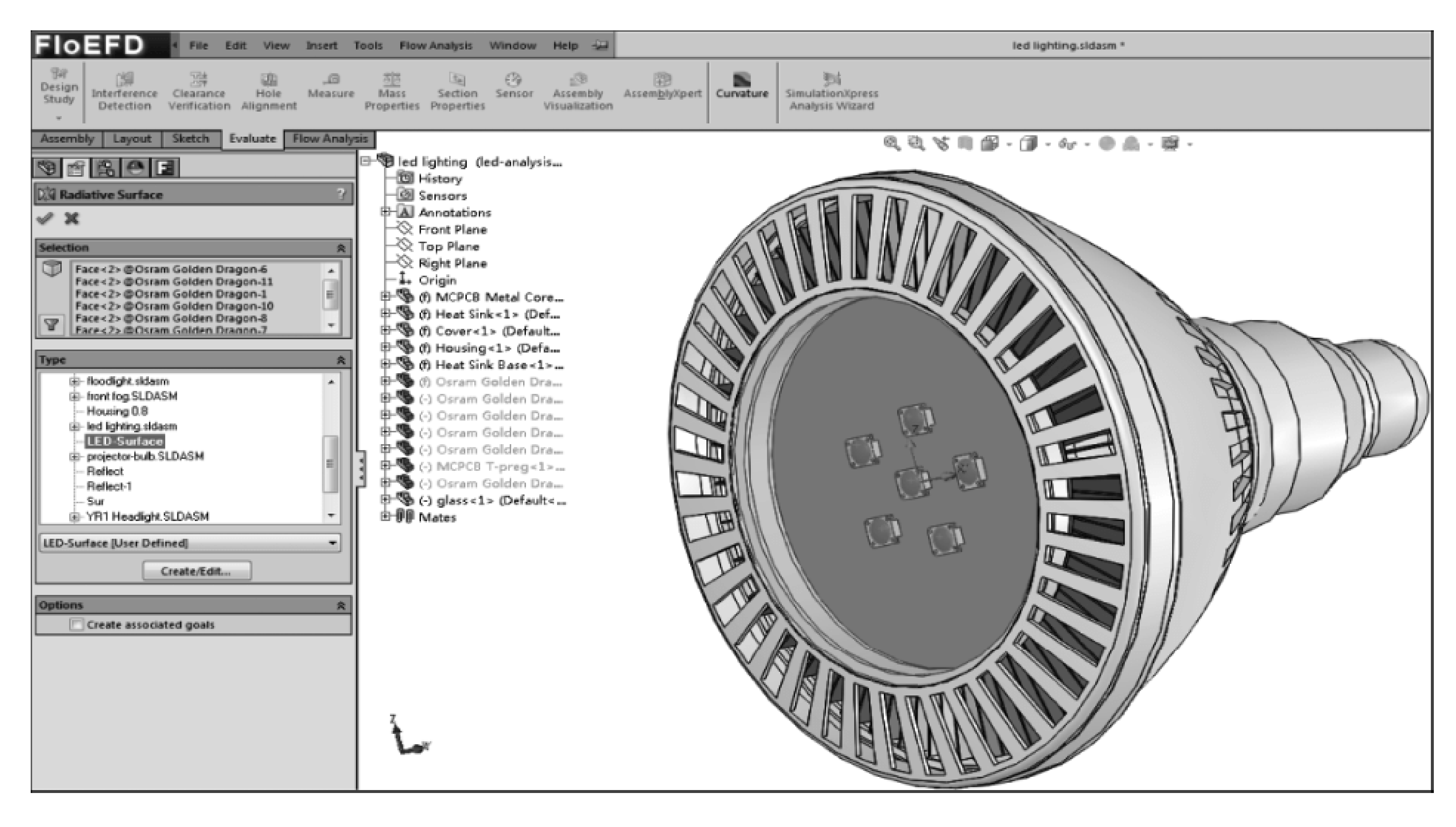


图 10-20　Radiative Surface 对话框

black matte。单击 Radiative Surface 对话框左上角绿色√，退出 Radiative Surface 对话框，完成 Radiative Surface 2 定义。

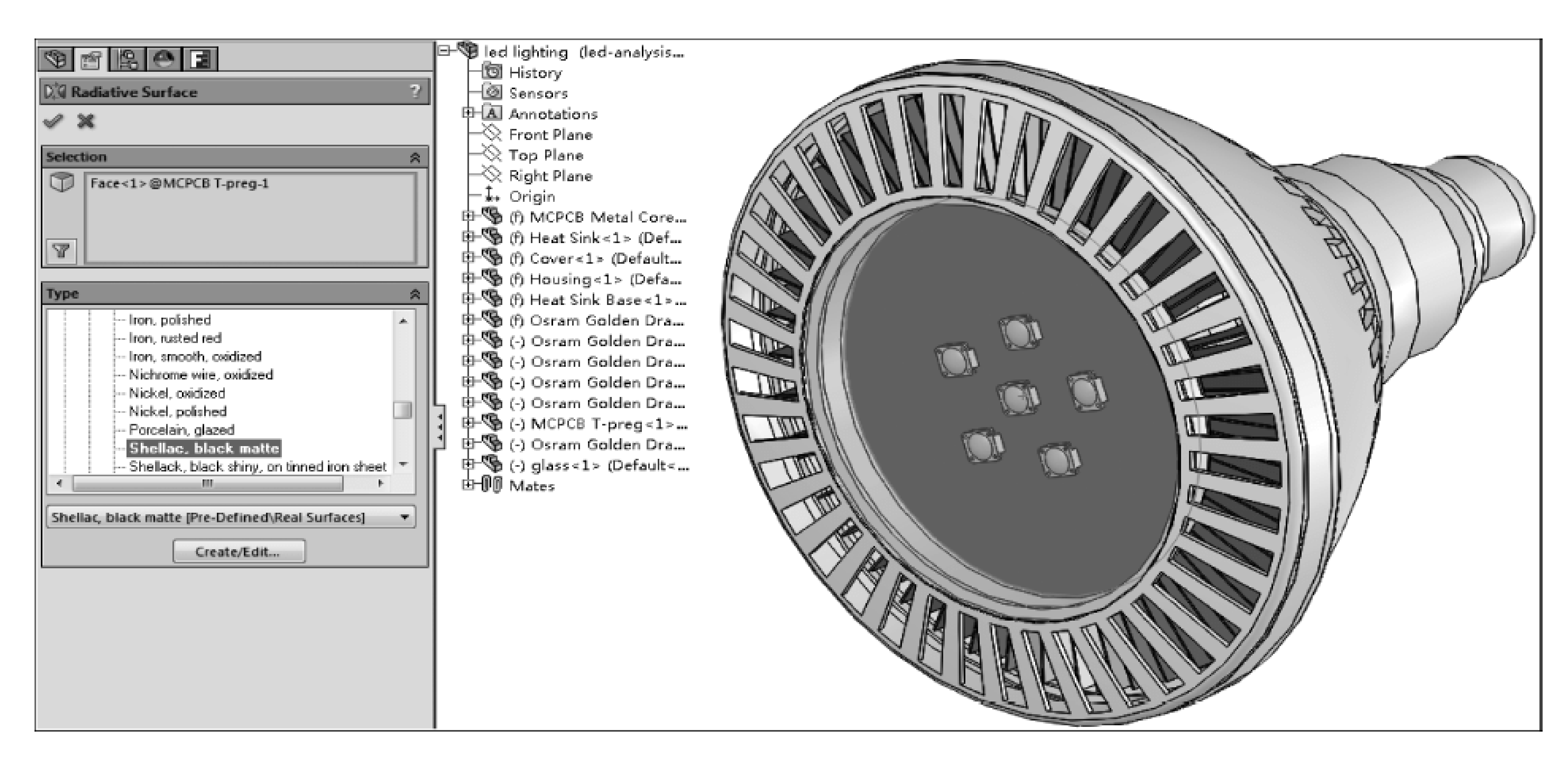


图 10-21　Radiative Surface 对话框

6. 定义工程目标

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，并且在弹出的菜单中选择 Insert Volume Goal。如图 10-22 所示，弹出 Volume Goals 对话框，选择 Osram Golden Dragon-11@led lighting 作为 Selection。

在 Parameters 中，勾选 Temperature(Solid)的 Max。

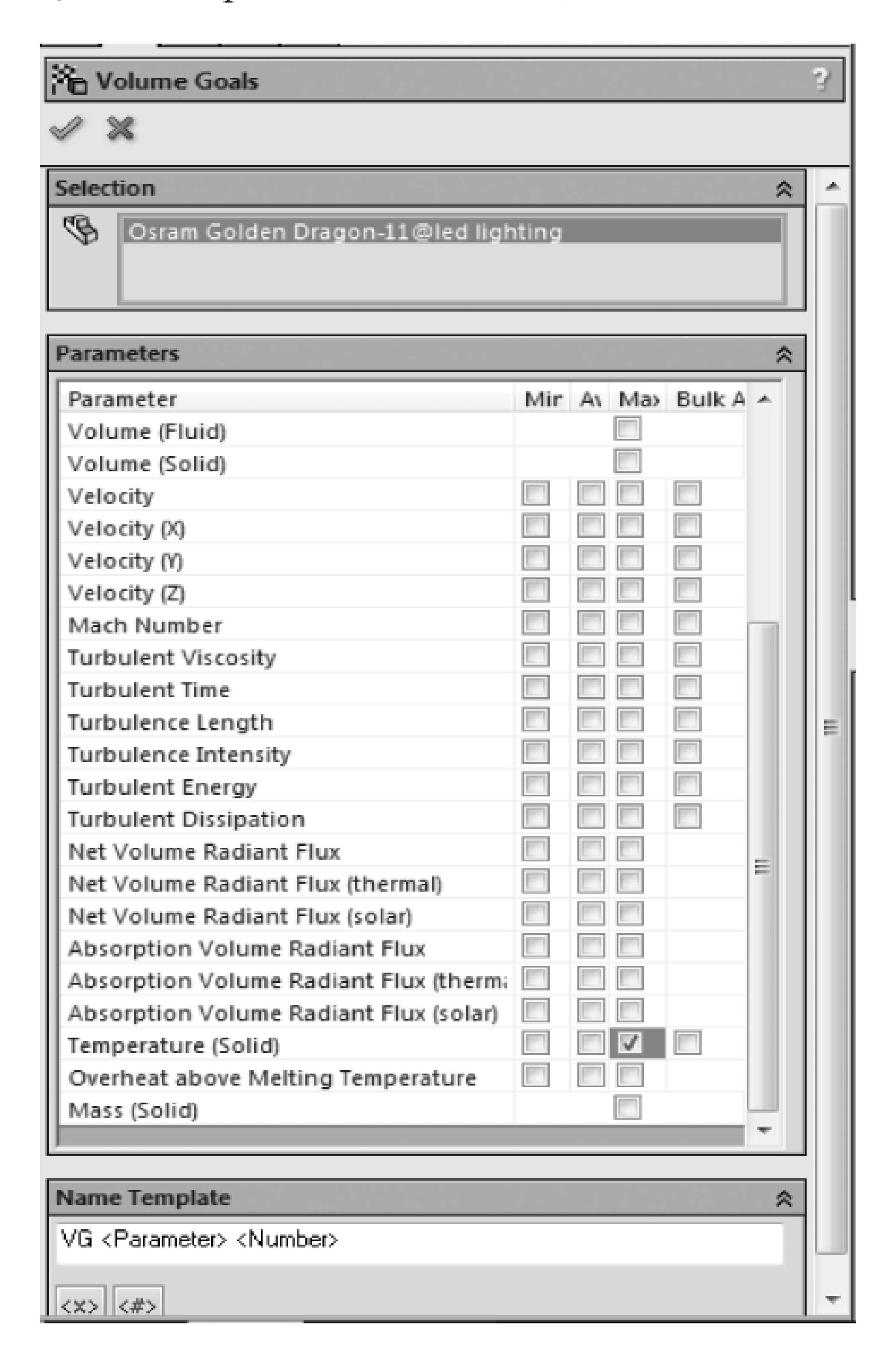


图 10-22　Volume Goals 对话框

单击 Volume Goals 对话框左上角√，退出 Volume Goals 对话框。

如图 10-23 所示，右击 FloEFD 模型树中的 VG Max Temperature(Solid)1，在弹出的菜单中选择 Copy to Component Instance。

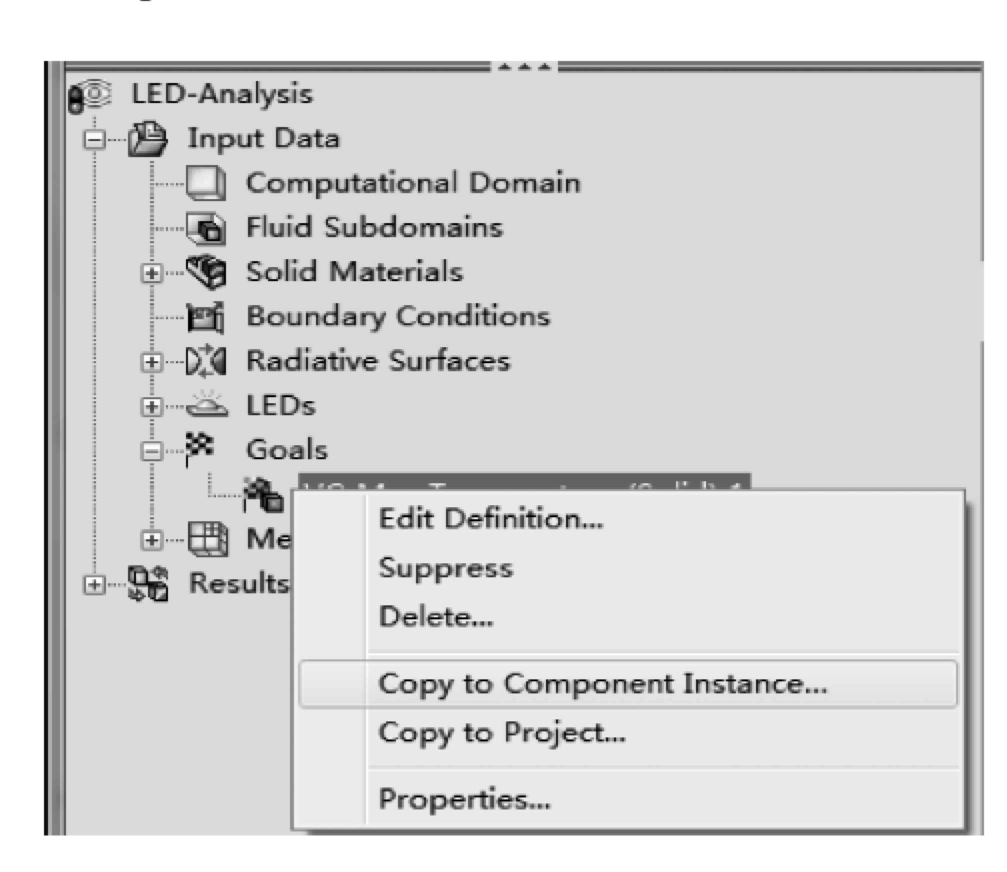


图 10-23　FloEFD 模型树

如图 10-24 所示，在弹出的 Copy to Component Instance 对话框中，单击对话框左上角√，退出 Copy to Component Instance 对话框。

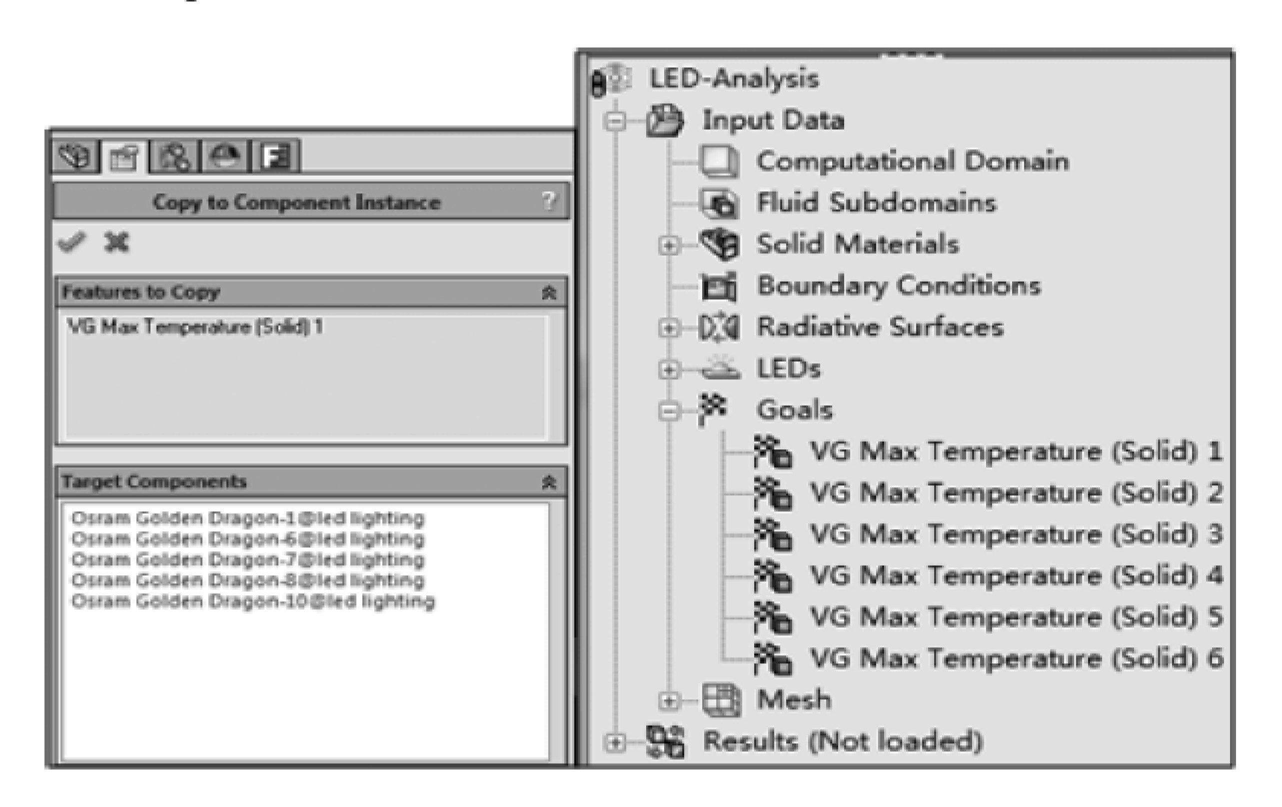


图 10-24 Copy to Component Instance 对话框

10.2.4 网格设置

如图 10-25 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Global Mesh，选择 Edit Definition。

在弹出的 Global Mesh Settings 对话框中，如图 10-26 所示，设置 Type 和 Settings。单击 Global Mesh Settings 对话框左上角√，退出 Global Mesh Settings 对话框。

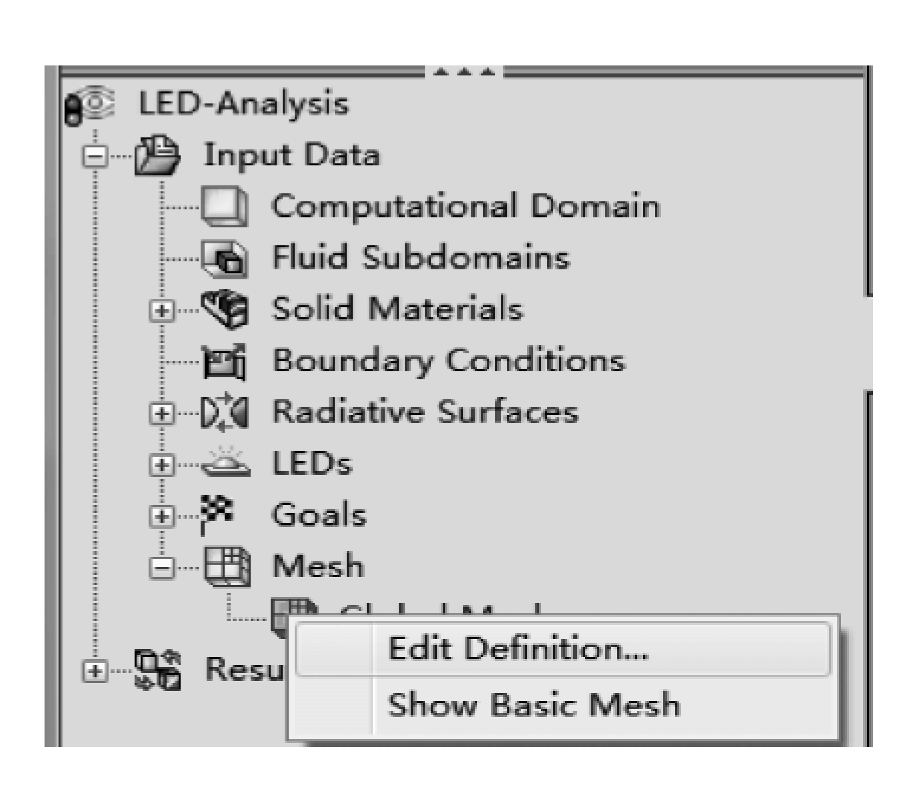


图 10-25 FloEFD 模型树

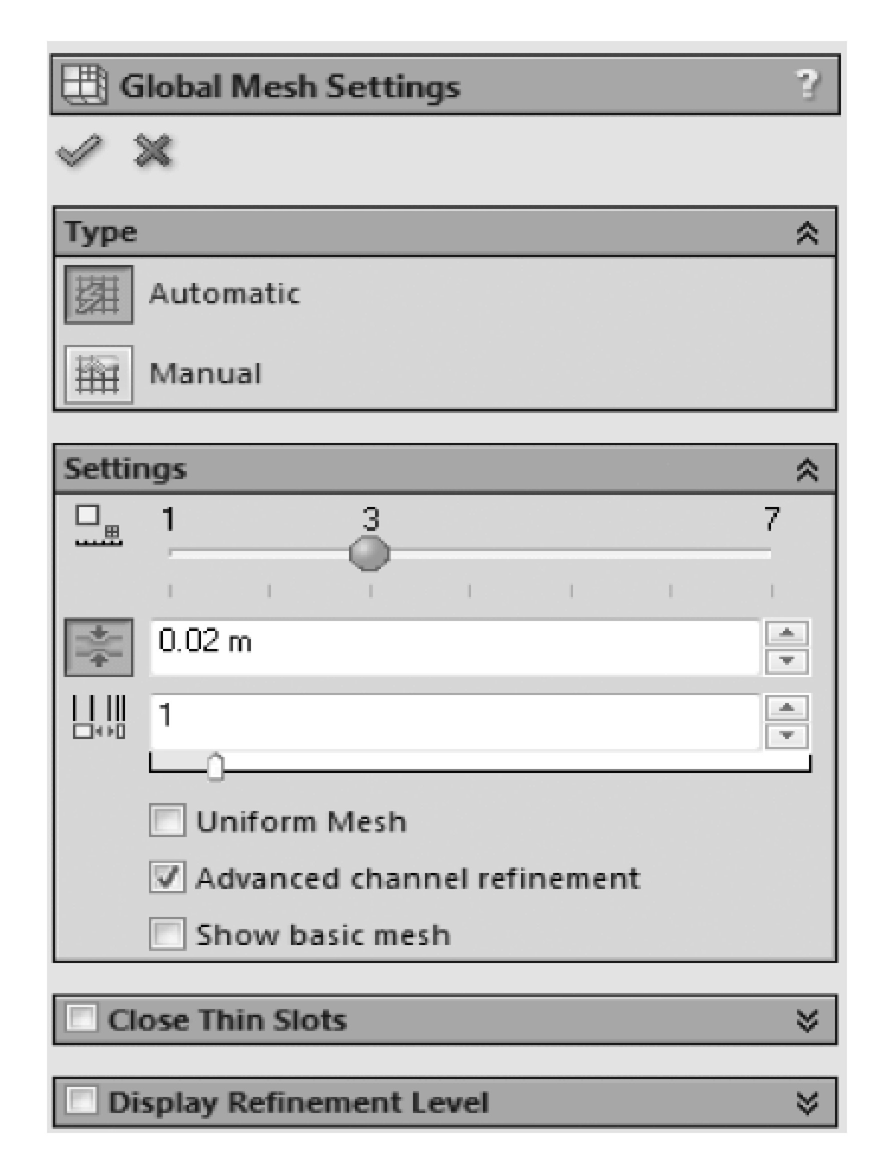


图 10-26 Global Mesh Settings

10.2.5 求解计算

（1）单击 Flow Analysis→Solve→Run。如图 10-27 所示，设置求解计算选项。其中 CPU and memory usage 中的 Use 确定了参与计算的 CPU 核数，可根据实际计算机配置进行调整。

（2）单击 Run 对话框中的 Run 按钮，对 LED-Analysis 项目进行求解计算。

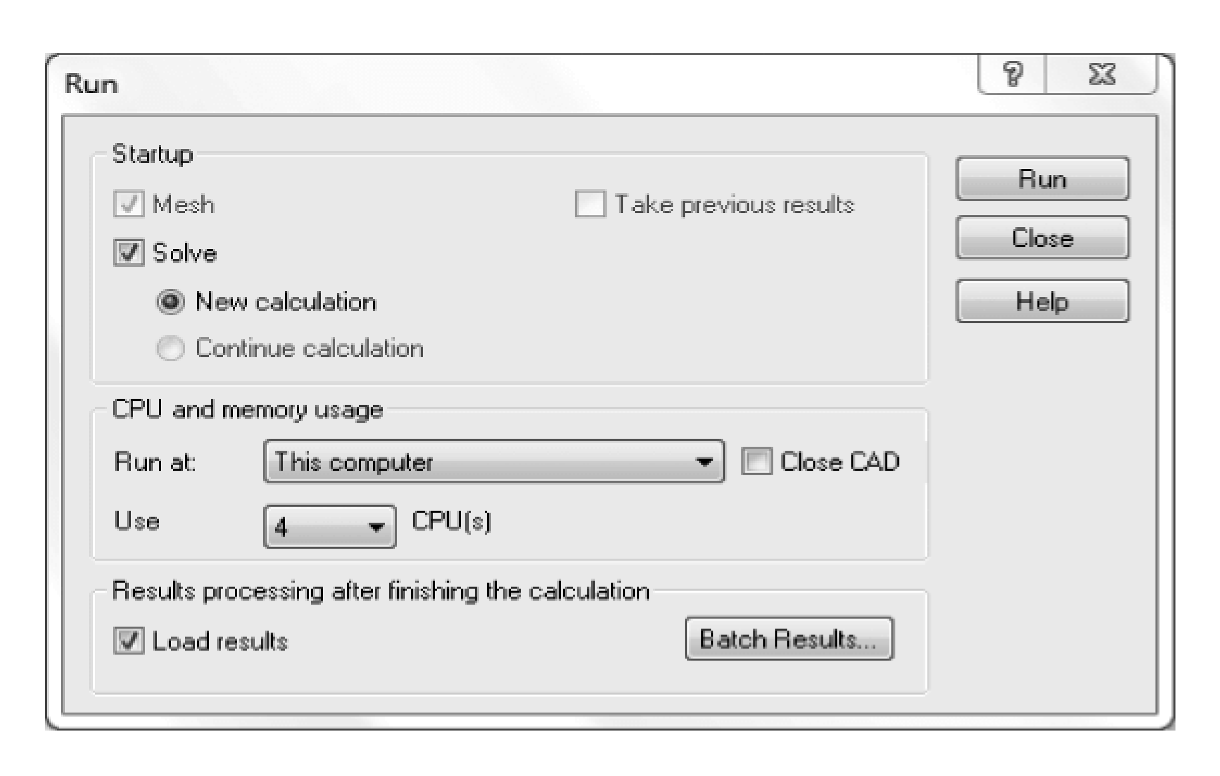


图 10-27 Run 对话框

10.2.6 仿真结果分析

1. 查看 LED 器件仿真结果

如图 10-28 所示，在 FloEFD 模型树中依次选择选择 6 个 LED 器件图标，在图形显示区域会显示每一个 LED 器件的仿真结果。其中仿真结果包括了 LED 器件的结温、热功耗以及光通量。按住鼠标左键进行拖曳，可以改变 LED 器件仿真结果显示的位置。

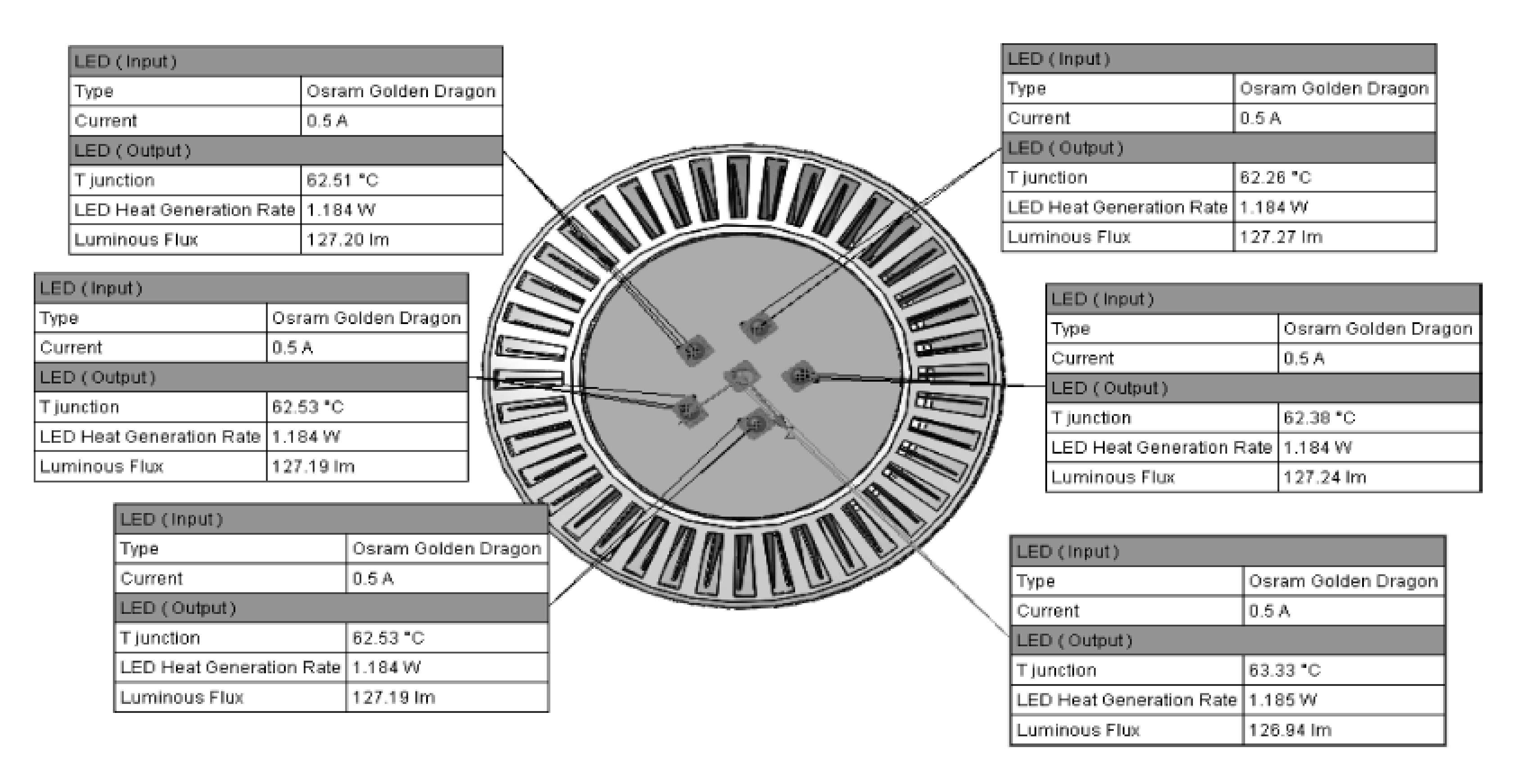


图 10-28 LED 仿真结果

2. 查看目标

如图 10-29 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Goal Plots，并且选择 Insert。

如图 10-30 所示，在弹出的 Goal Plot 对话框中，勾选 All，并且勾选 Options 的 Group charts by parameter。

图 10-29　FloEFD 模型树

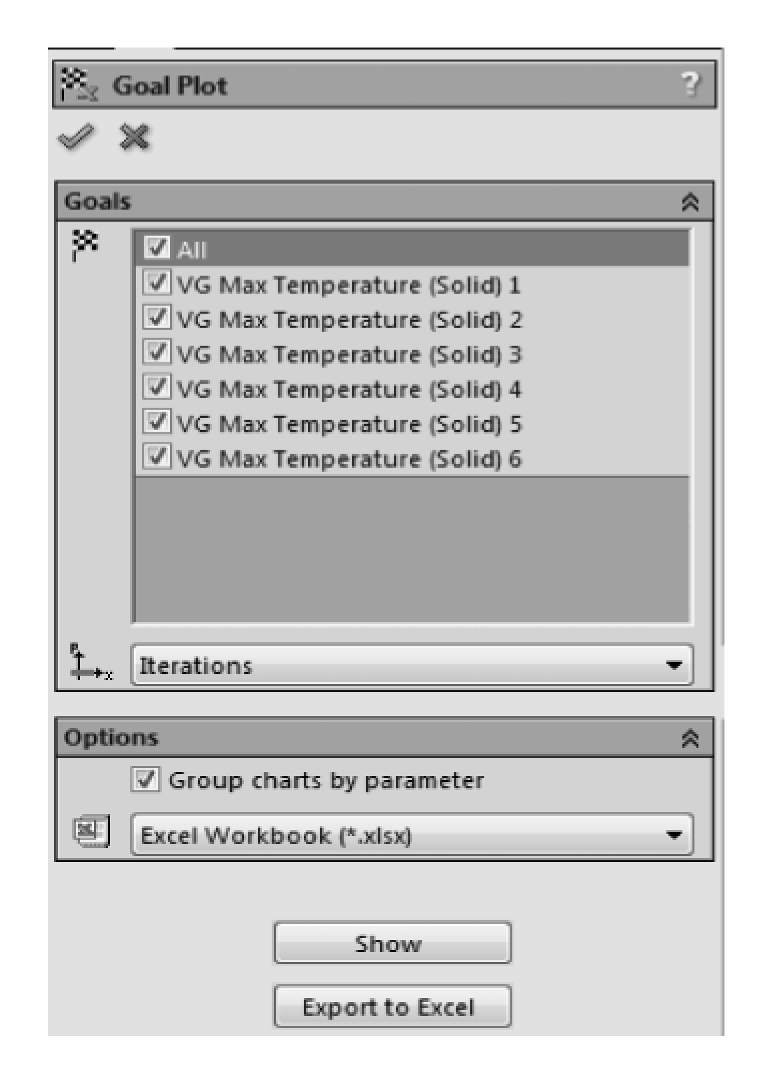
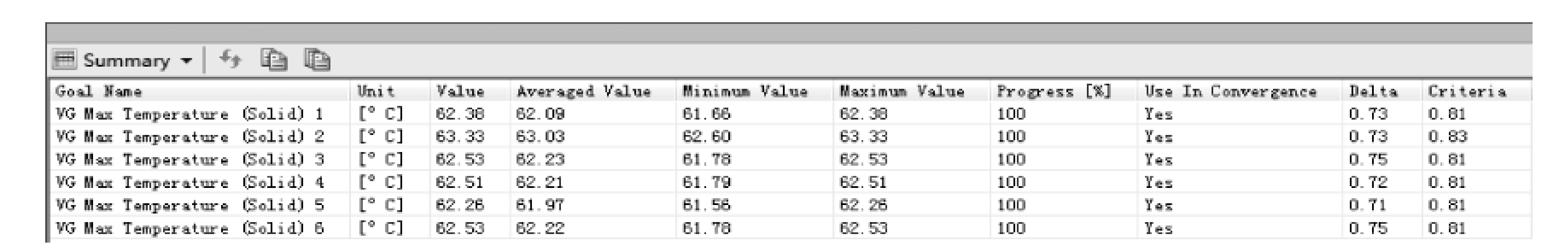


图 10-30　Goal Plot 对话框

单击 Show 按钮，如图 10-31 所示，显示工程目标结果值和结果计算曲线。其中 LED 最高目标温度为 65.92℃，符合 LED 灯具设计要求。



Summary

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
VG Max Temperature (Solid) 1	[° C]	62.38	62.09	61.66	62.38	100	Yes	0.73	0.81
VG Max Temperature (Solid) 2	[° C]	63.33	63.03	62.60	63.33	100	Yes	0.73	0.83
VG Max Temperature (Solid) 3	[° C]	62.53	62.23	61.78	62.53	100	Yes	0.75	0.81
VG Max Temperature (Solid) 4	[° C]	62.51	62.21	61.79	62.51	100	Yes	0.72	0.81
VG Max Temperature (Solid) 5	[° C]	62.26	61.97	61.56	62.26	100	Yes	0.71	0.81
VG Max Temperature (Solid) 6	[° C]	62.53	62.22	61.78	62.53	100	Yes	0.75	0.81

图 10-31　工程目标结果值

单击 Goal Plot 对话框左上角绿色√，退出 Goal Plot 对话框。

3. 表面云图

如图 10-32 所示，在图形显示区域仅显示 Heat Sink <1>。右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Surface Plots，并且选择 Insert。

在 Contours 下选择 Temperature(Solid)，并且单击 Adjust Minimum and Maximum 图标，并且单击 Reset to Plot Maximum 和 Reset to Plot Minimum。

4. 切面云图

如图 10-33 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plots，并且选择 Insert。

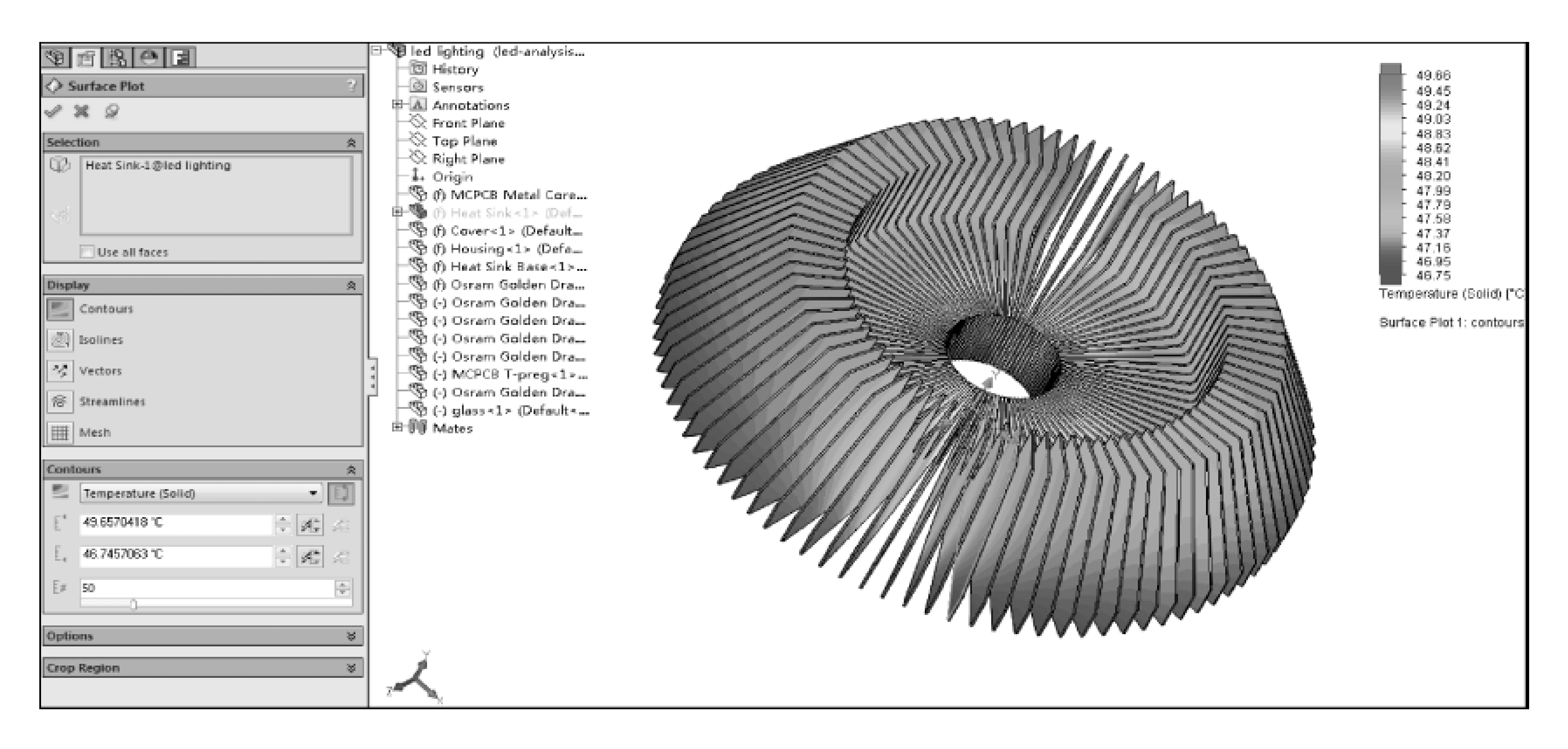


图 10-32　散热器表面云图

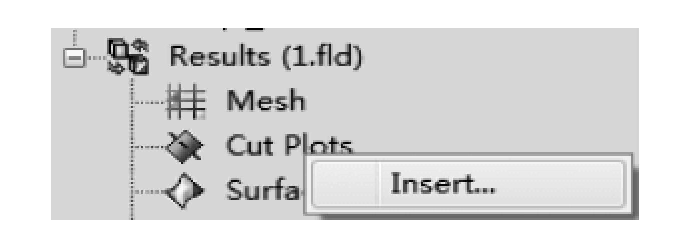


图 10-33　FloEFD 模型树

如图 10-34 所示，在弹出的 Cut Plot 对话框中，选择 Front Plane 作为 Selection，并且 Contours 选择 Temperature。单击 Adjust Minimum and Maximum 图标，展开表面温度云图上下限设置选项。通过 Reset to Plot Maximum 和 Reset to Plot Minimum 设置选项，调整温度云图的上下限。将 Number of Levels 设置为 50。

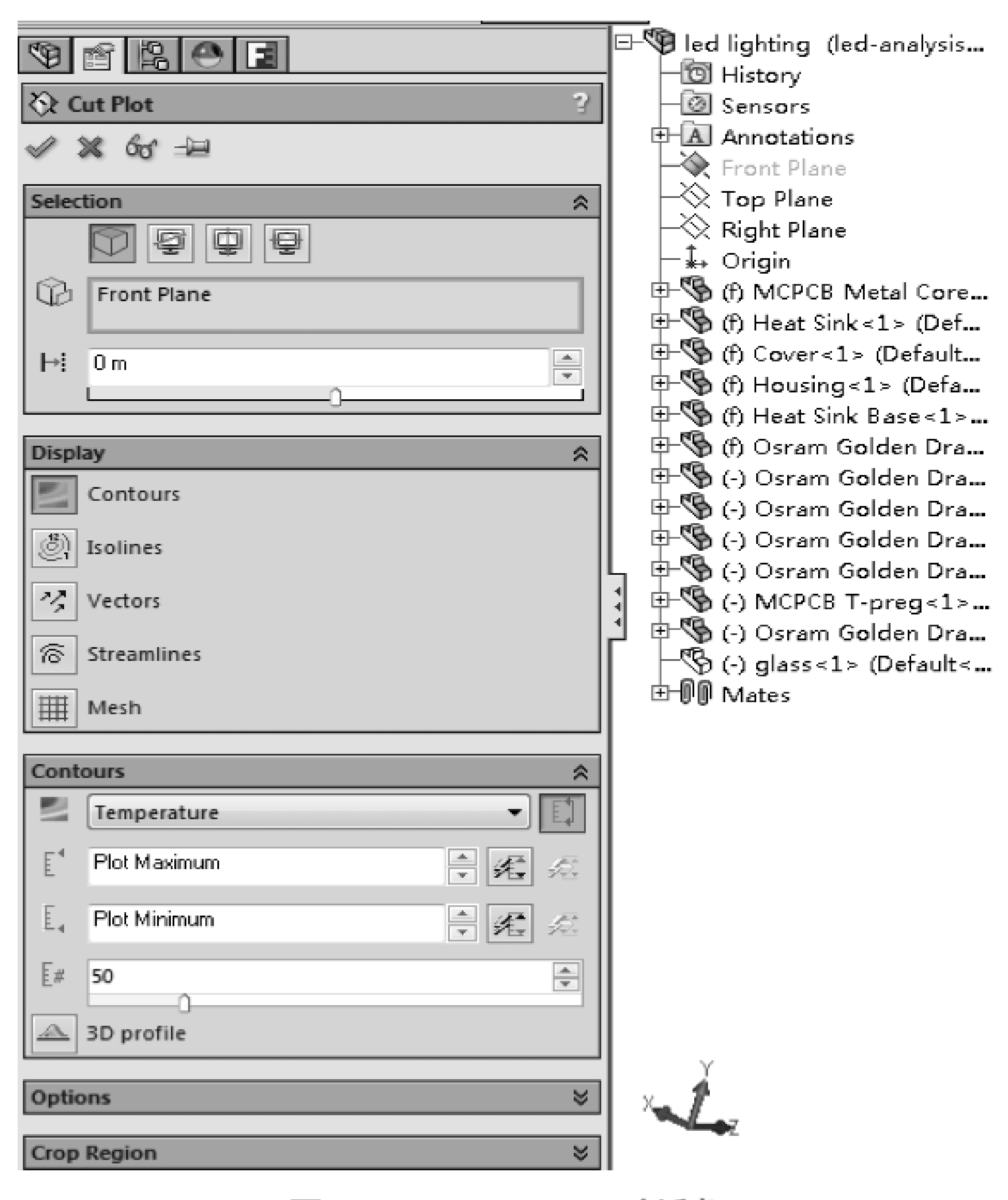


图 10-34　Cut Plot 对话框

单击 Cut Plot 对话框左上角绿色√，退出 Cut Plot 对话框。单击 View→Display→Wireframe 命令。图 10-35 所示为模型显示区域的切面温度云图。

单击图 10-35 中的 Temperature，在弹出的菜单中选择 Velocity，并且单击右侧弹出的绿色√。图 10-36 所示为模型显示区域的切面速度云图。

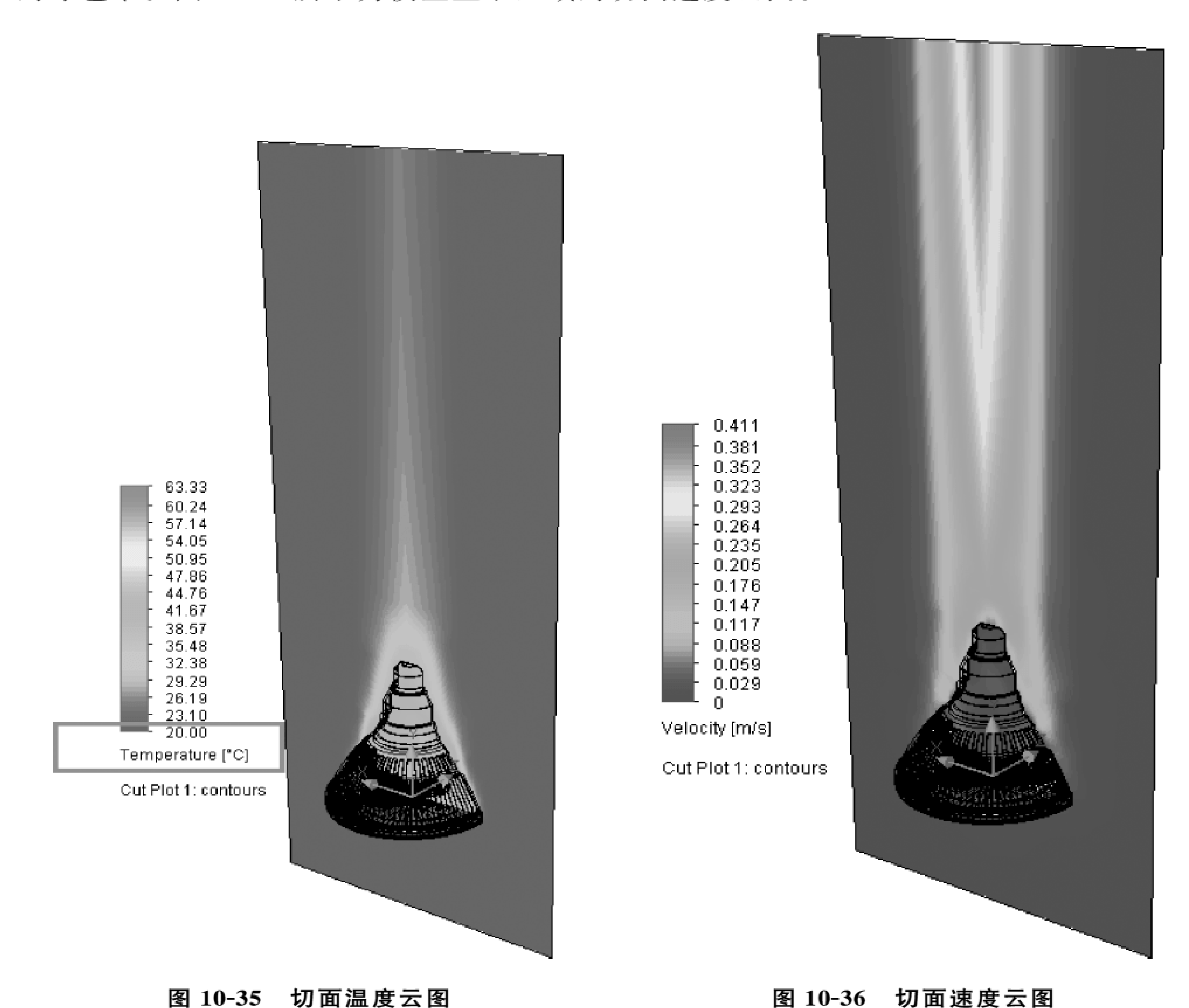


图 10-35 切面温度云图　　**图 10-36 切面速度云图**

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plot1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏切面云图。

思考题

1. 本实例中 LED 器件的特性采用工程数据库中的 Osram Golden Dragon 的特性数据，如果采用 CREE XT-E 的特性数据，LED1～LED6 的结温分别为多少？LED1～LED6 的光通量分别多少？

2. 如果本例灯具使用的 LED 器件是资料库中未知的，试讨论如何针对该器件进行灯具的热设计。

第11章 LED射灯热仿真分析

11.1 LED 射灯热仿真分析介绍

LED 射灯采用发光二极管作为光源。LED 技术的不断进步为 LED 射灯的设计提供了新的机遇，大功率白光 LED 正逐步取代传统卤素灯，成为射灯的新型光源。LED 光源在发光原理、节能、环保的方面都要优于传统照明灯具，而且，LED 发光的单向性对射灯配光提供了完美支持。

如图 11-1 所示为一款强迫对流冷却 LED 射灯。与自然对流冷却的 LED 射灯类似，首先 LED 器件产生的热量通过热传导的方式进入至金属 PCB 基板（MCPCB 板）中。在通过导热界面材料之后进入至金属散热器。安装在射灯后部的风扇从环境中抽入冷空气，将散热器上的热量通过强迫对流的方式带走。在强迫对流冷却的 LED 射灯中，金属 PCB 基板（MCPCB 板）的热传导性能、导热界面材料的工作特性、金属散热器的结构和风扇的工作特性对于 LED 器件温度都有比较大的影响。本仿真分析主要关注 LED 器件结温是否超过设计限制，以及基于软件的参数优化功能进行散热器性能的优化设计。

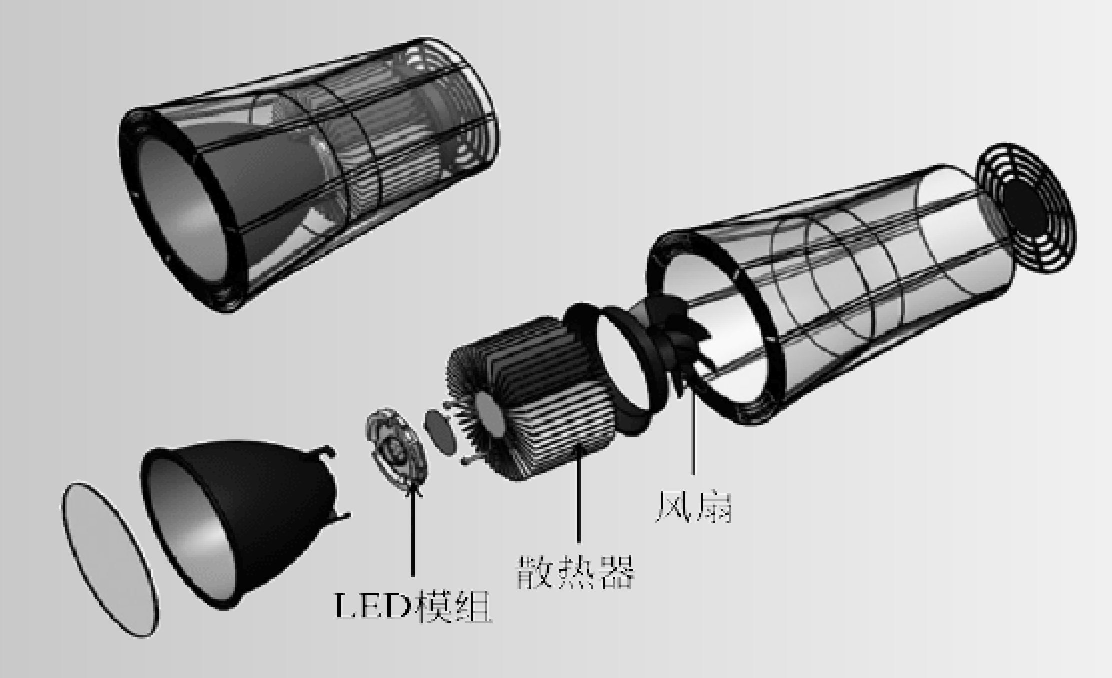


图 11-1　强迫对流冷却 LED 射灯

11.2 LED 射灯热仿真分析步骤

11.2.1 建立模型

1. 打开模型

单击 File→Open。在 Open 对话框中,找到 LED-Spotlight 文件夹中的 FloEFD LED Demo. SLDASM,并且单击 Open。

2. 检查模型

单击 Flow Analysis→Tool→Check Geometry。如图 11-2 所示,在弹出的 Check Geometry 对话框中单击 Check,查看 LED 射灯几何模型是否通过模型检查。

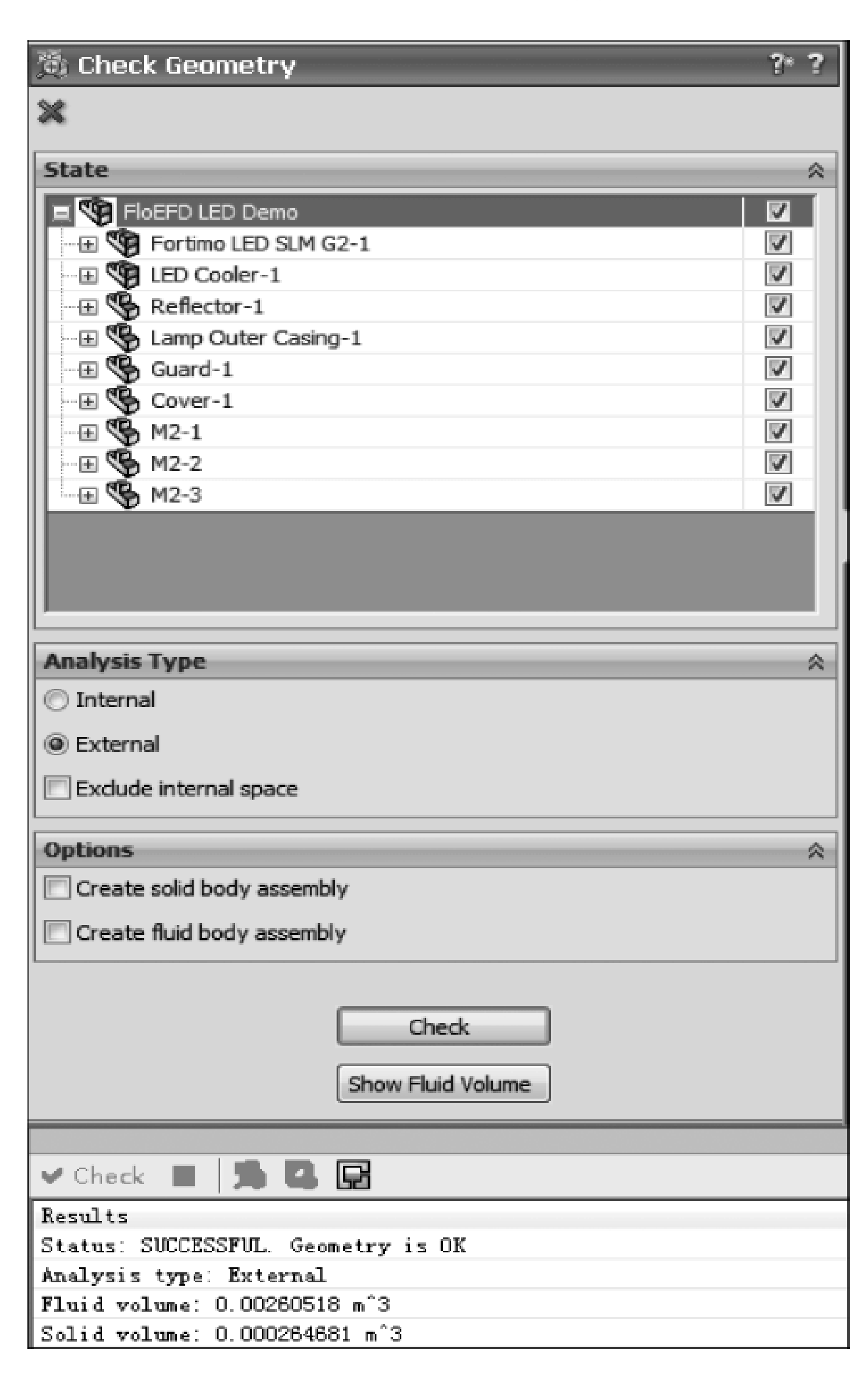


图 11-2 Check Geometry 对话框

单击 Check Geometry 对话框左上角红色×,退出 Check Geometry 对话框。

3. 创建 FloEFD 项目

选择 Flow Analysis→Project→Wizard。

如图 11-3 所示，进入 Wizard-Project Name 对话框之后，在 Project name 中输入 Project-1。

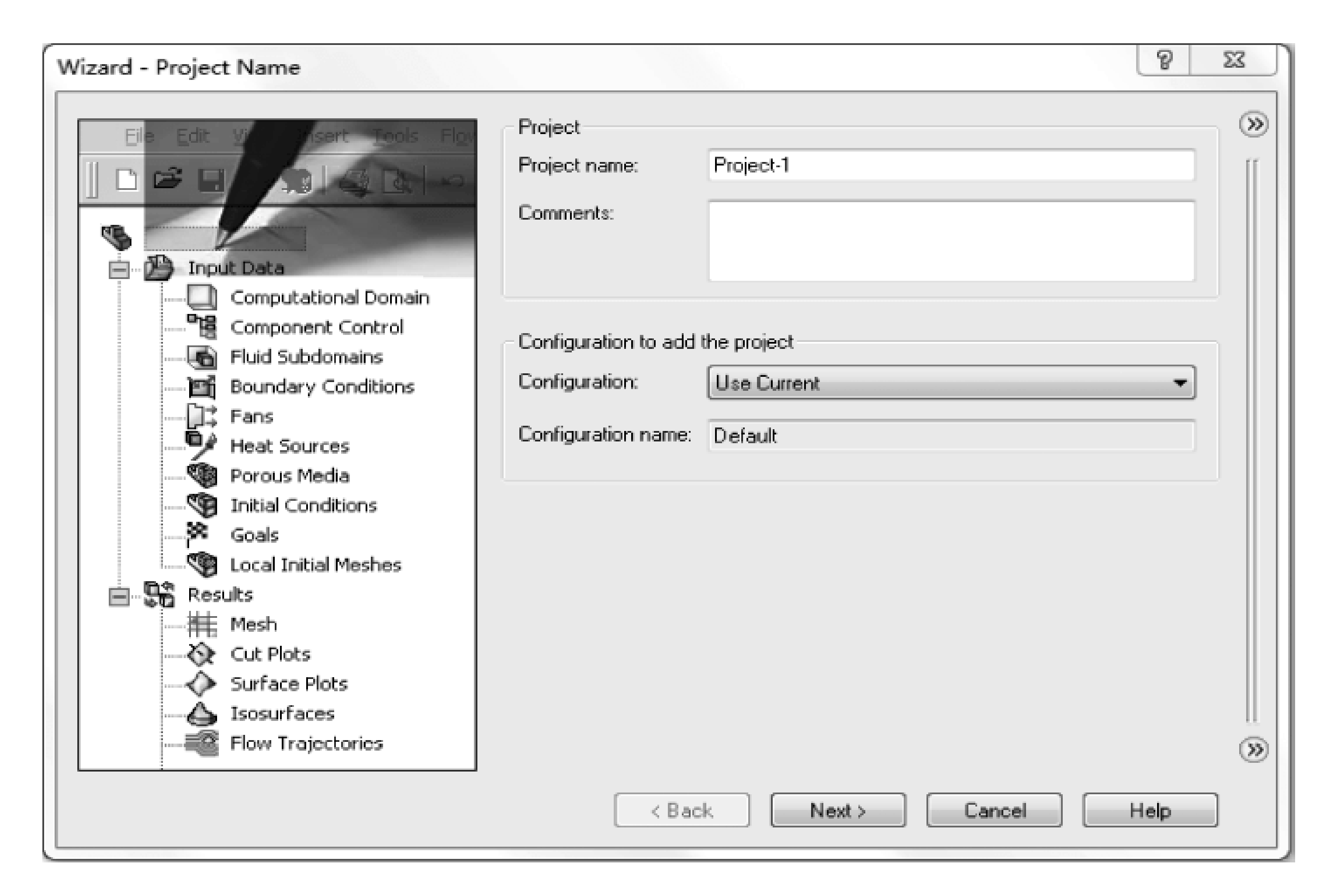


图 11-3 Wizard-Project Name 对话框

单击 Next 按钮。

如图 11-4 所示，进入 Wizard-Unit System 对话框之后，选择 SI(m-kg-s)作为此 FloEFD 项目的单位系统，并且将 Temperature 的单位修改为℃。

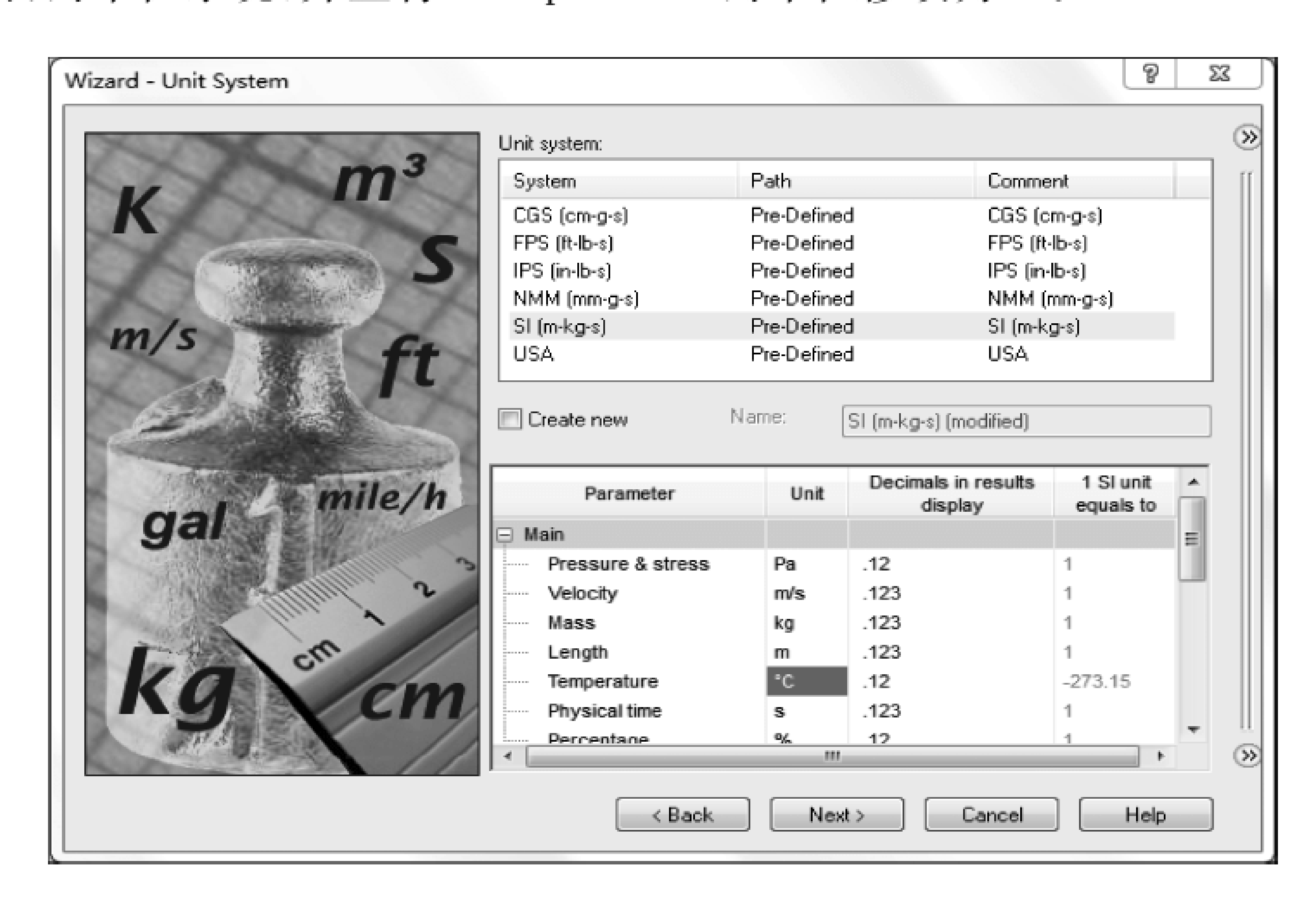


图 11-4 Wizard-Unit System 对话框

单击 Next 按钮。

如图 11-5 所示，进入 Wizard-Analysis Type 对话框之后，选择 External 作为 Analysis type。勾选 Heat Conduction in solids 选项。

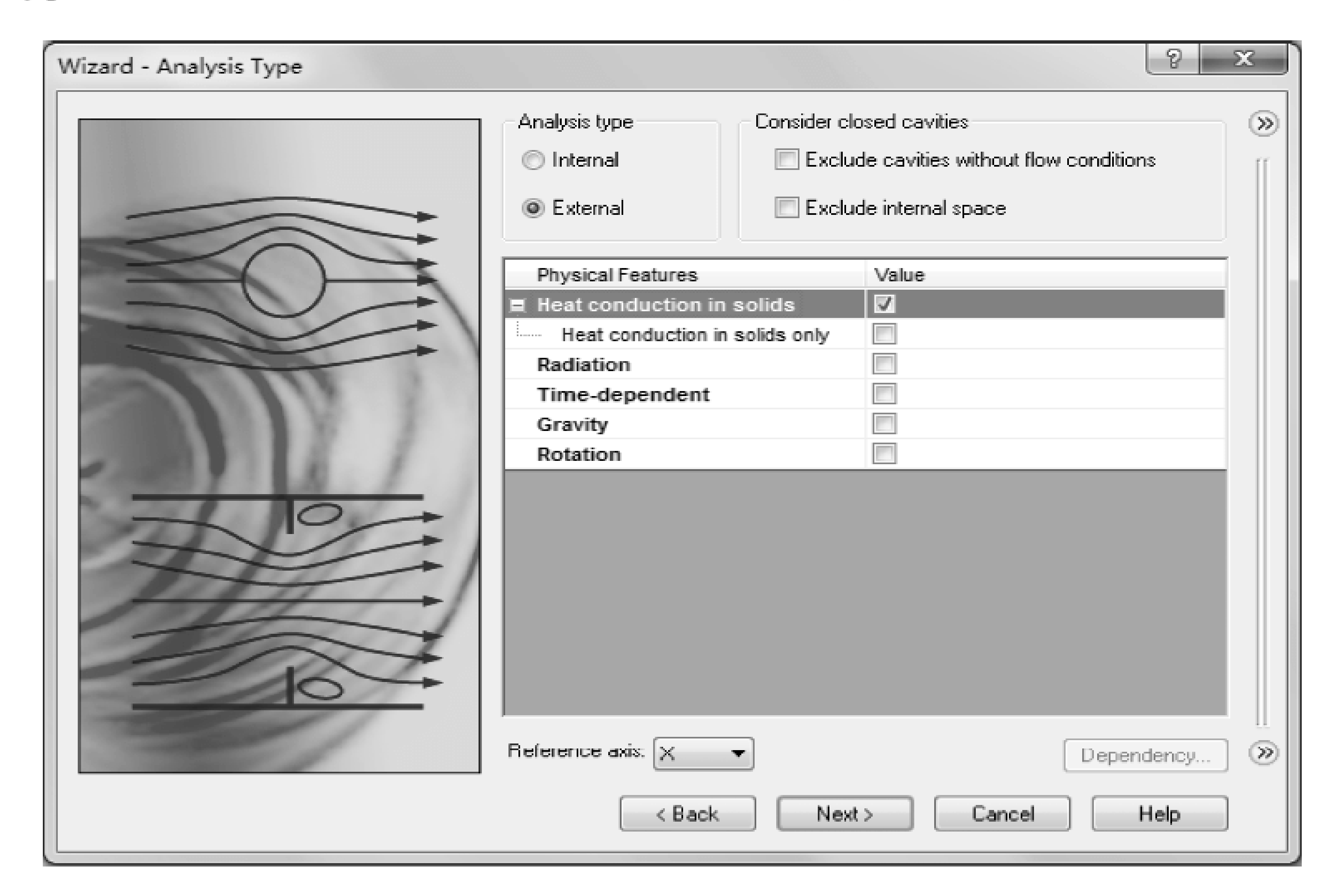


图 11-5　Wizard-Analysis Type 对话框

单击 Next 按钮。

如图 11-6 所示，进入 Wizard-Default Fluid 对话框之后，展开 Gases→Pre-Defined，选择 Air 作为项目的默认流体，并且单击 Add。

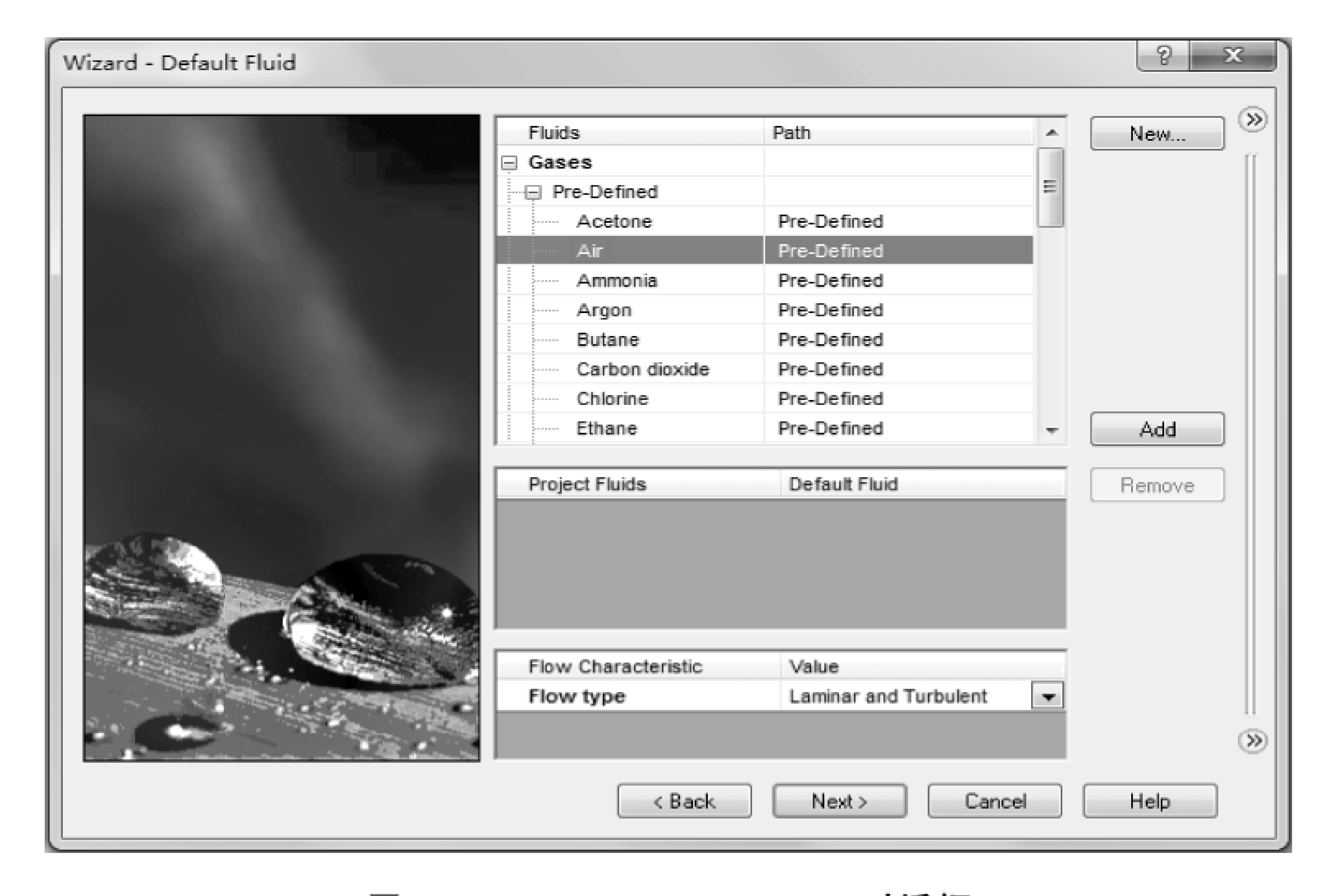


图 11-6　Wizard-Default Fluid 对话框

单击 Next 按钮。

如图 11-7 所示，进入 Wizard-Default Solid 对话框之后，展开 Pre-Defined→Polymers，选择 Epoxy Resin 作为项目默认固体。

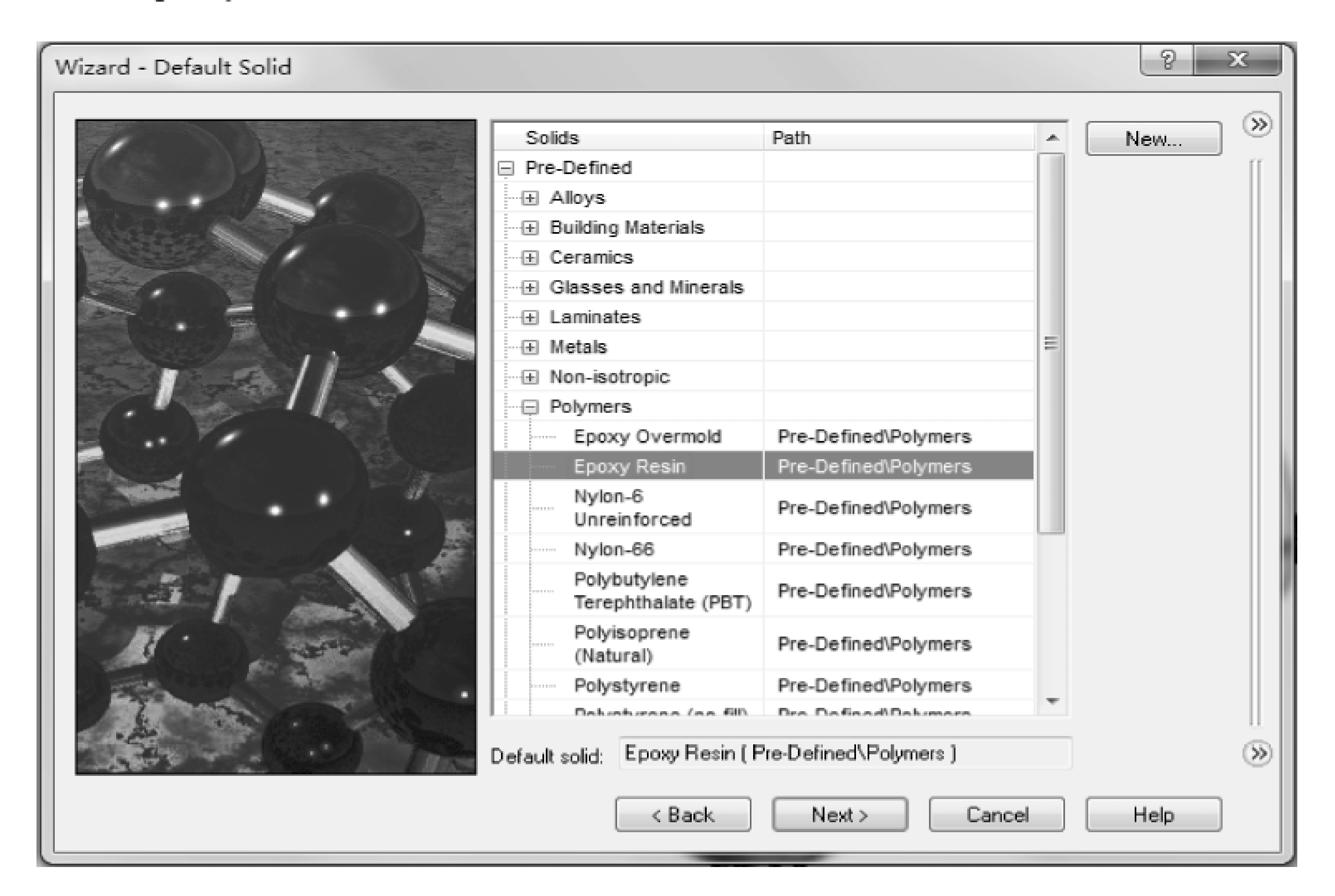


图 11-7 Wizard-Default Solid 对话框

单击 Next 按钮。

如图 11-8 所示，进入 Wizard-Wall Conditions 对话框之后，保持默认值不变。

单击 Next 按钮。

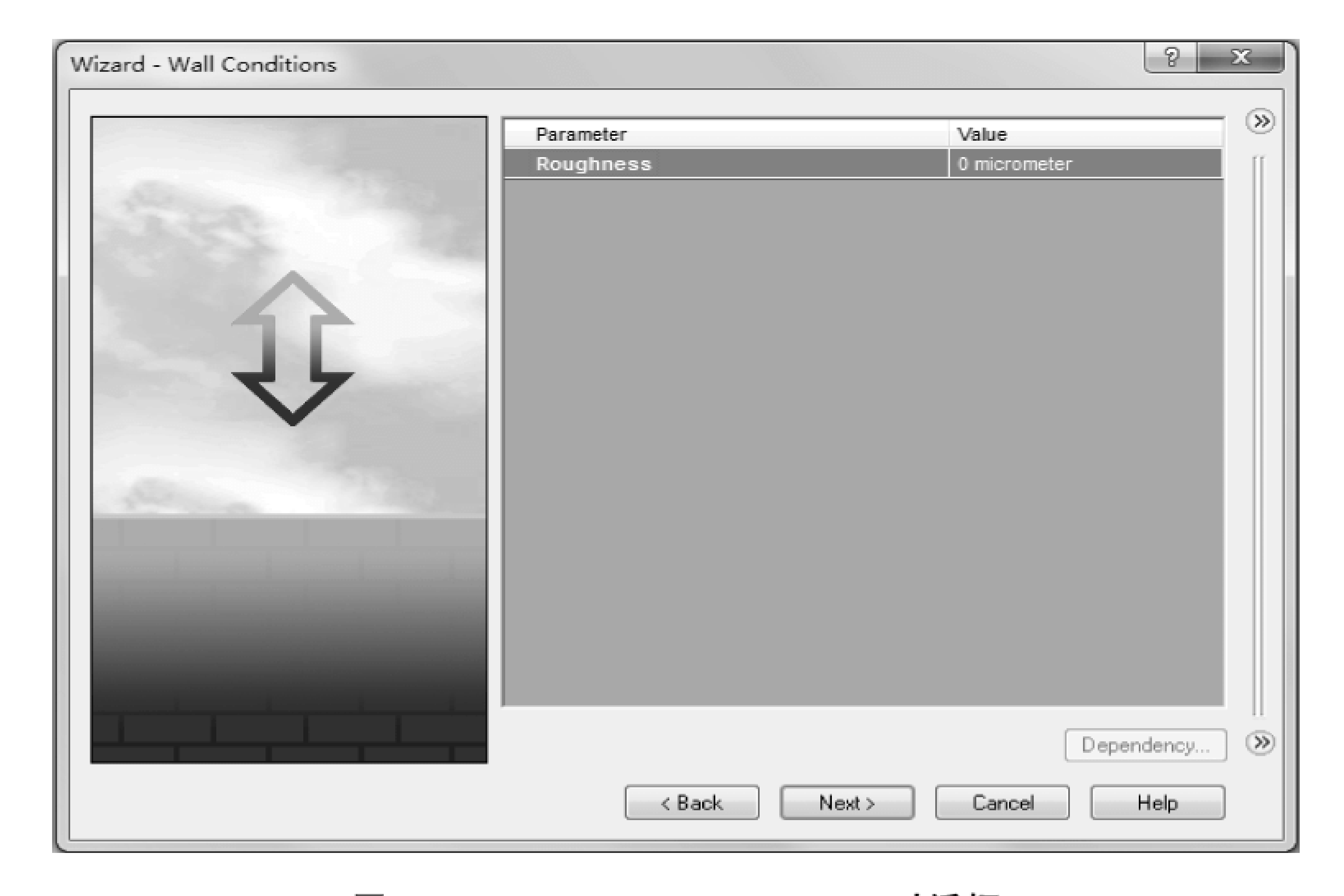


图 11-8 Wizard-Wall Conditions 对话框

如图 11-9 所示，进入 Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框之后，展开 Thermodynamic Parameters，将其 Temperature 设置为 25℃。展开 Solid Parameters，将其 Initial solid temperature 设置为 25℃。

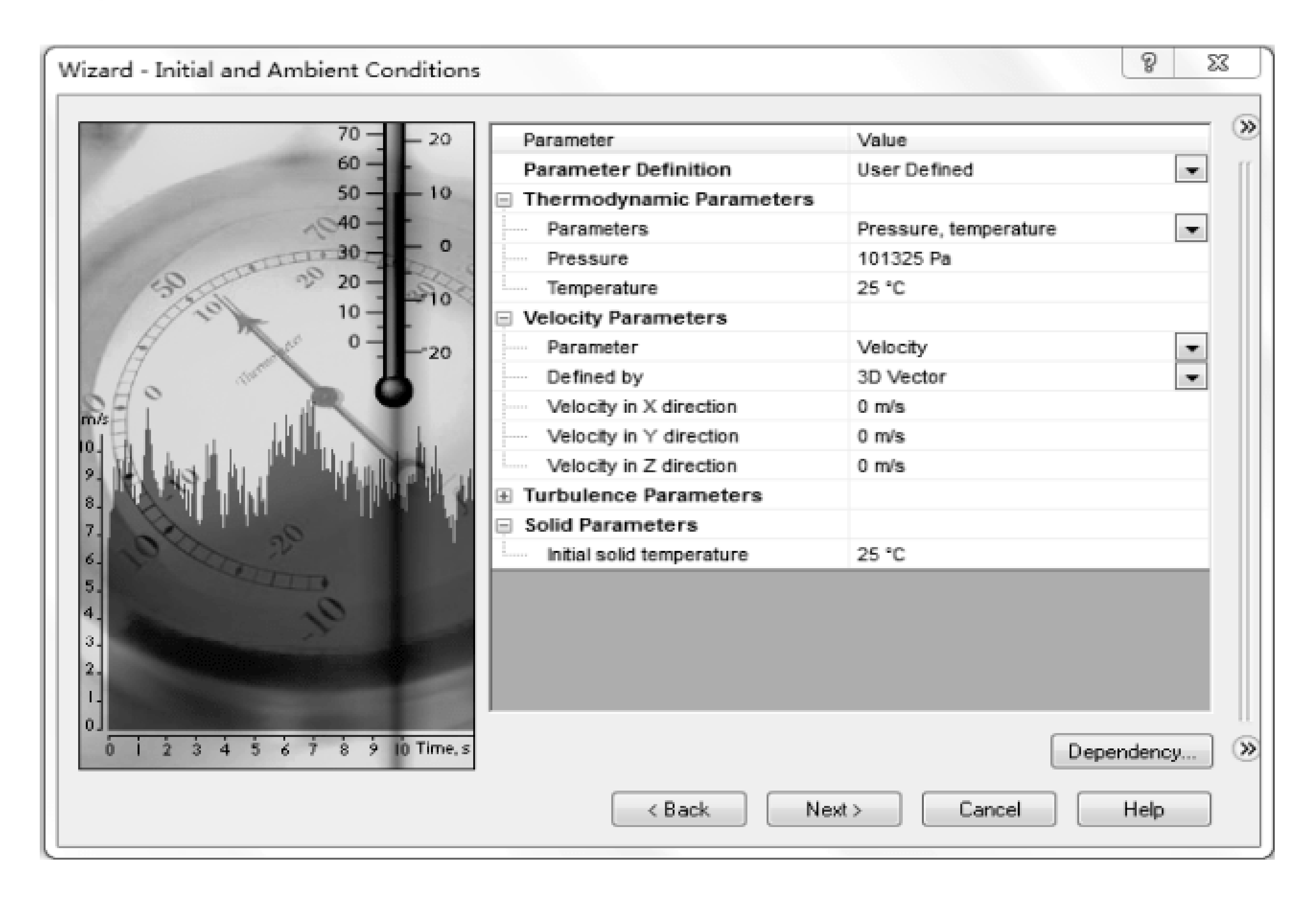


图 11-9　Wizard-Initial and Ambient Conditions 对话框

单击 Finish 按钮。

11.2.2　求解域调整

如图 11-10 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Computational Domain，选择 Edit Definition。

进入 Computational Domain 对话框之后，如图 11-11 所示，设置 Size and Conditions。

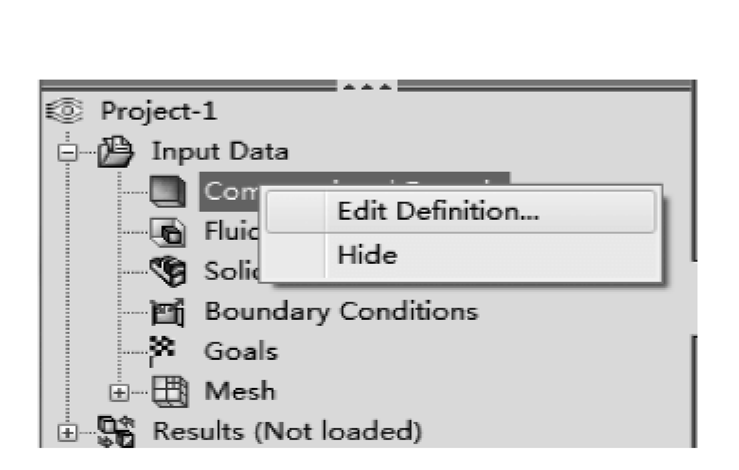


图 11-10　FloEFD 模型树中的 Computational Domain

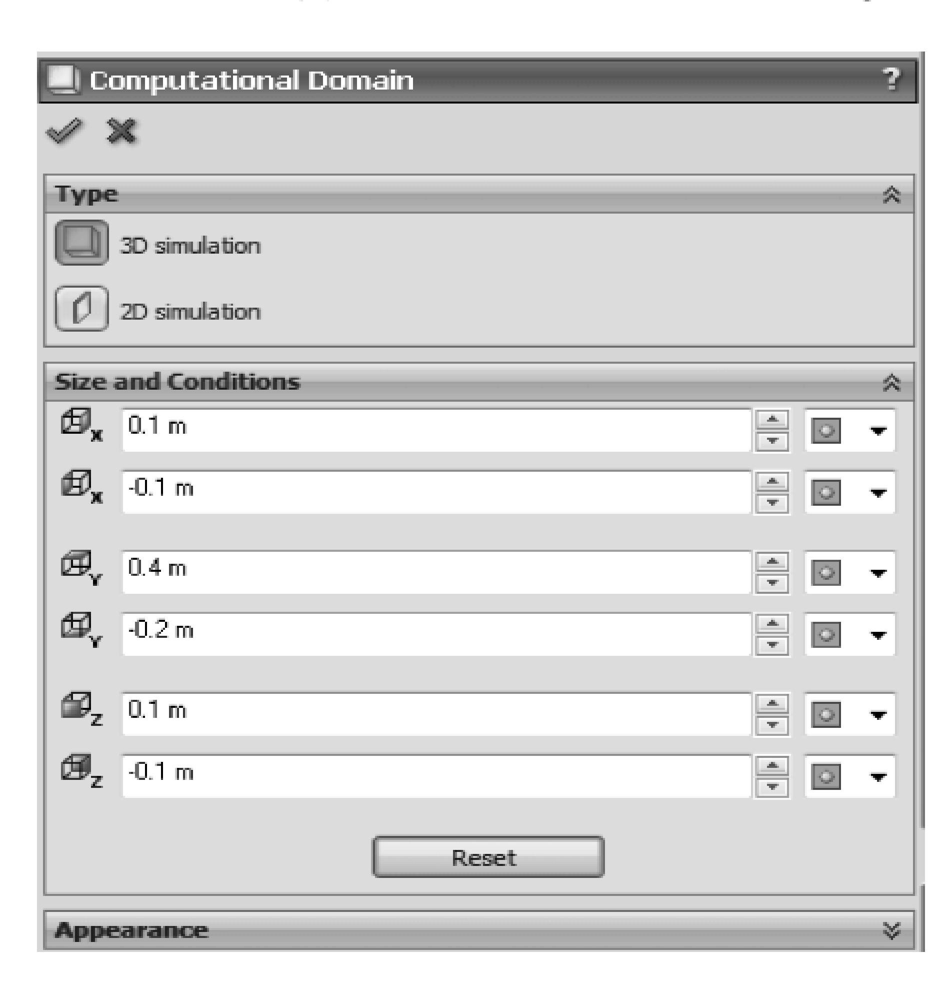


图 11-11　Computational Domain 设置对话框

单击 Computational Domain 对话框左上角绿色√，退出 Computational Domain 对话框。

11.2.3 参数设置

1. 创建风扇特性

图 11-12 所示为 Sunon HA60151V3-E01U-A99 型电风扇的特性曲线与结构尺寸。

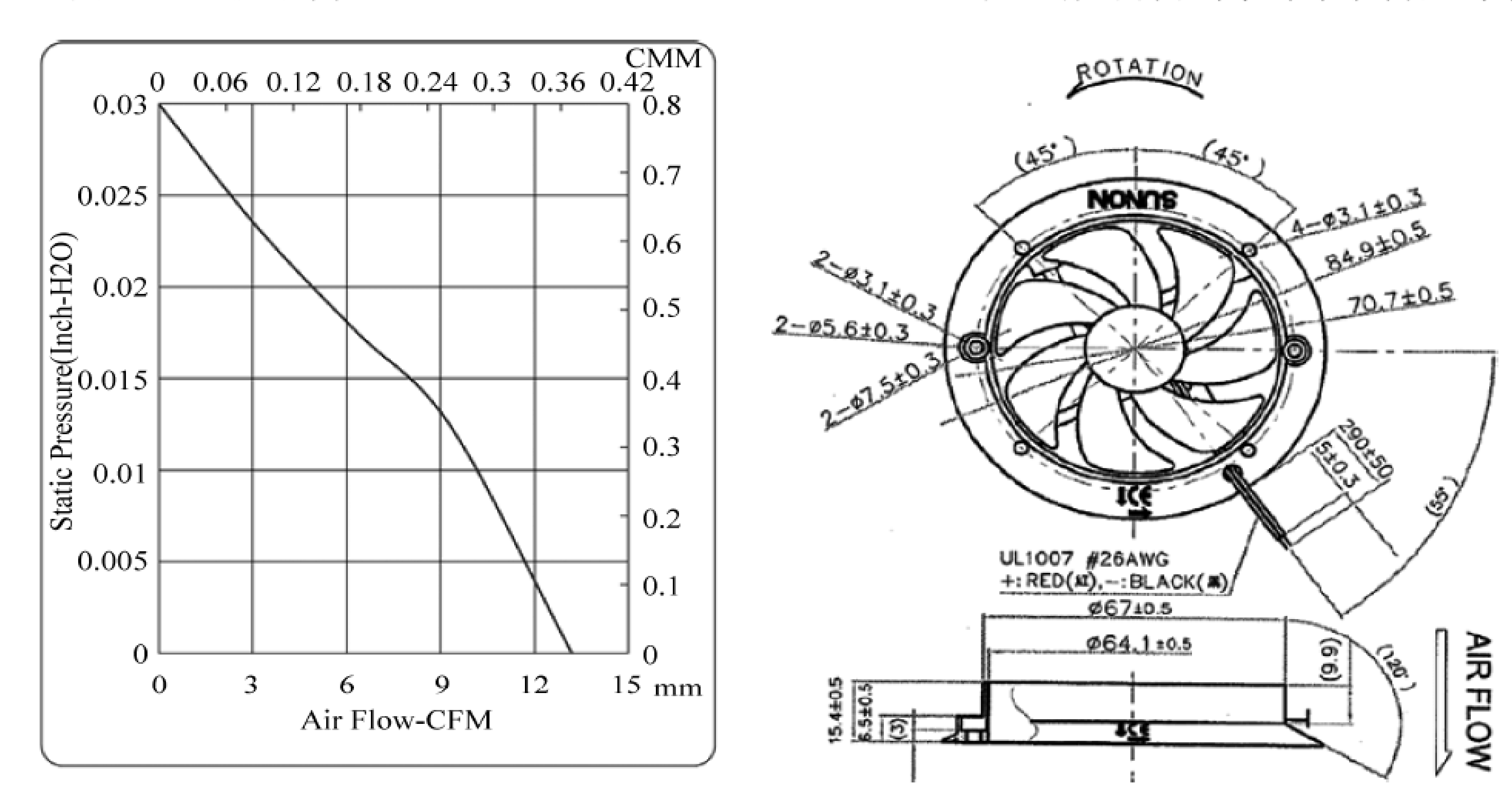


图 11-12 风扇特性曲线与结构尺寸

选择 Flow Analysis→Tools→Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 设置对话框中，选择 Database tree 下的 Fans→User Defined。

选择 File→New→New Item，在弹出 Item Properties 页中，双击空白单元格，如图 11-13 和图 11-14 所示设置风扇的特性数据和特性曲线。

选择 File→Save。

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	Sunon HA60151V3-E01U-A99
Comments	Fortimo LED Cooler
Fan Type	Axial
Set up reference density	☑
Reference density	1.2 kg/m^3
Mass/Volume flow rate	Volume flow rate
Value	(Table)
Rotor speed	240.855437 rad/s
Outer diameter	0.067 m
Hub diameter	0.03 m
Direction of rotation	Clockwise

图 11-13 风扇特性数据

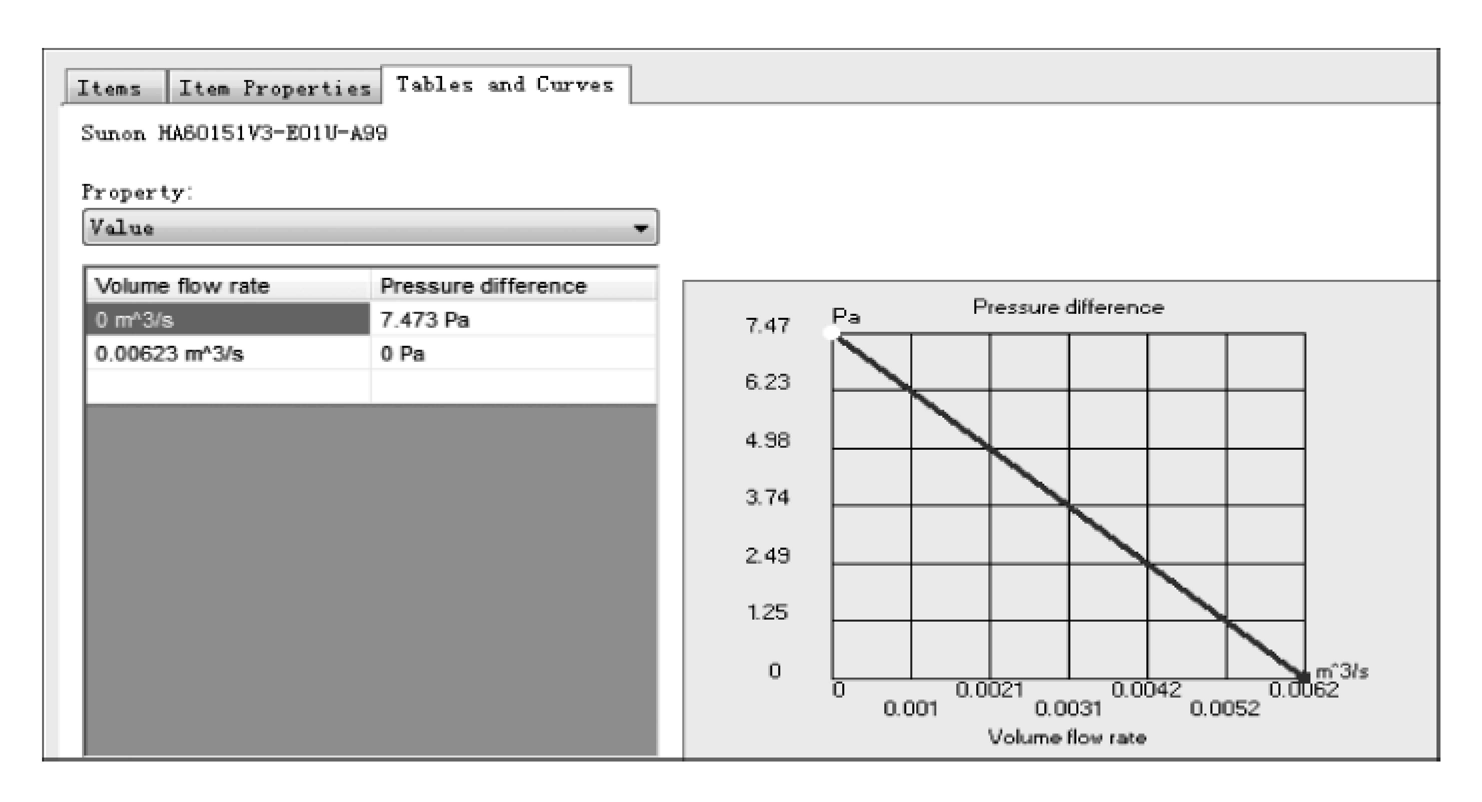


图 11-14　风扇特性曲线

选择 File→Exit，退出 Engineering Database 设置对话框。完成风扇 Sunon HA60151V3-E01U-A99 的创建。

2．定义风扇

选择 Flow Analysis→Insert→Fan。如图 11-15 所示，在弹出的 Fan 设置对话框中，选择 Internal Fan 作为风扇类型。

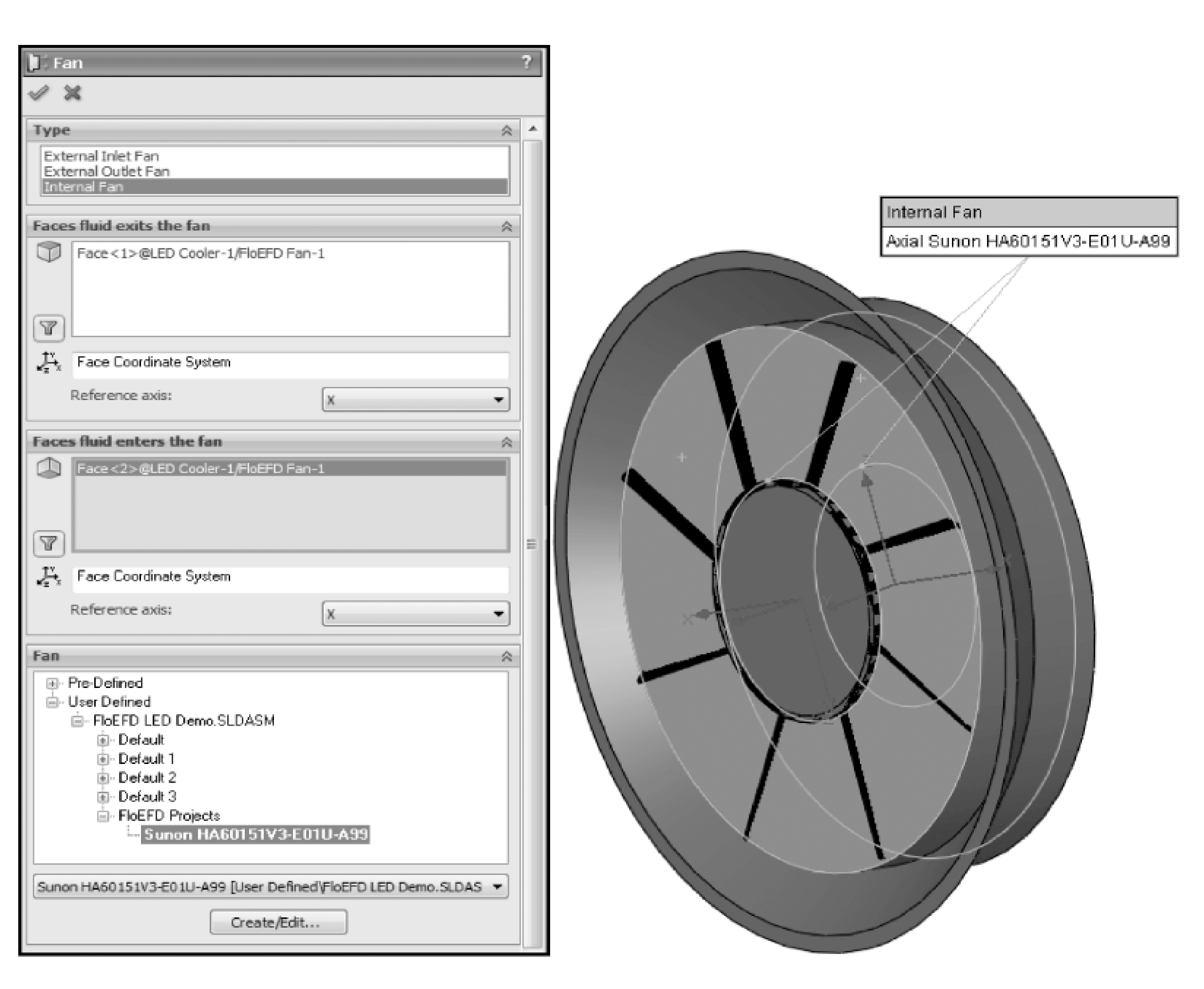


图 11-15　Fan 特性设置对话框

选择 Face < 1 >@LED Cooler-1/FloEFD Fan-1 作为 Faces fluid exits the fan。选择 Face < 2 >@LED Cooler-1/FloEFD Fan-1 作为 Faces fluid enters the fan。

选择 Sunon HA60151V3-E01U-A99 作为 Fan 特性。

单击 Fan 对话框左上角绿色√，退出 Fan 对话框。

3. 定义 LED

选择 Flow Analysis→Insert→LED，如图 11-16 所示，在弹出的 LED 设置对话框中，选择 Face < 1 >@Fortimo LED SLM G2-1/Luxeon Rebel-1/Luxeon Rebel-1 作为 LED 的顶面。选择 Face < 2 >@Fortimo LED SLM G2-1/Luxeon Rebel-1/Luxeon Rebel-1 作为 LED 的底面。

选择 Philips Luxeon Rebel 作为 LED 的类型。

将 Forward Current 设置为 0.7A。

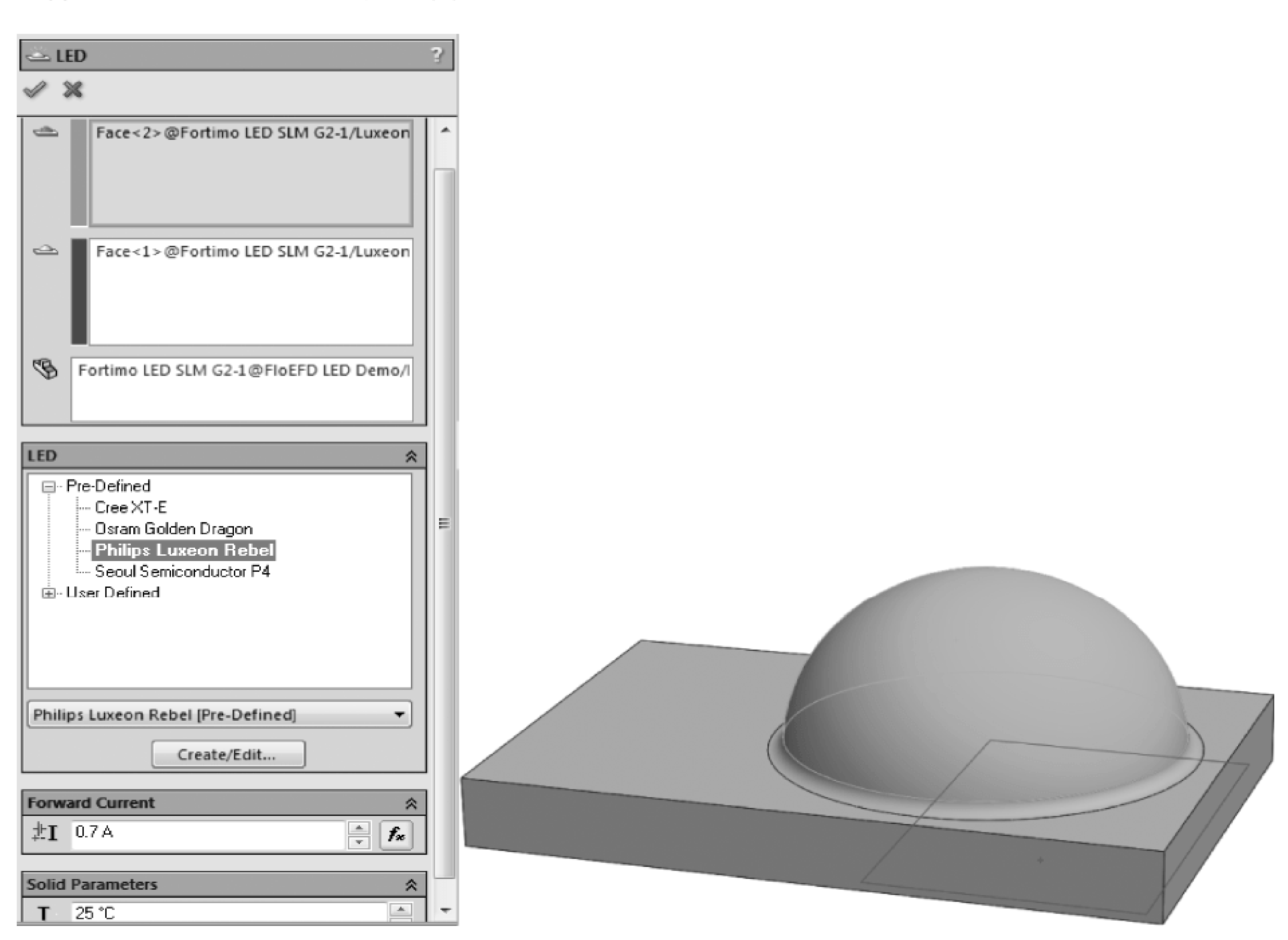


图 11-16　LED 特性设置对话框

单击 LED 对话框左上角绿色√，退出 LED 对话框。

如图 11-17 所示，右击 FloEFD 模型树中的 LED 1，在弹出的菜单中选择 Copy to Component Instance。

如图 11-18 所示，在弹出的 Copy to Component Instance 对话框中，单击对话框左上角绿色√，退出 Copy to Component Instance 对话框。

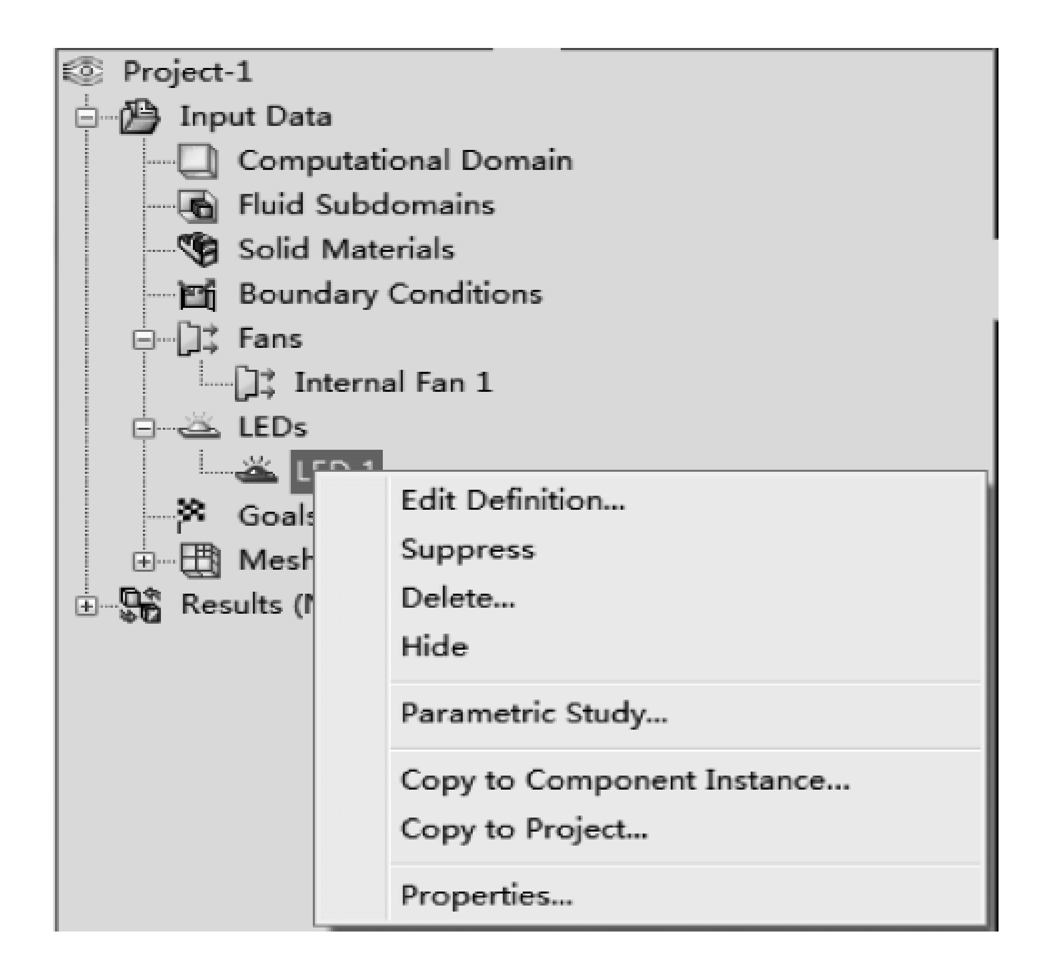


图 11-17 FloEFD 模型树

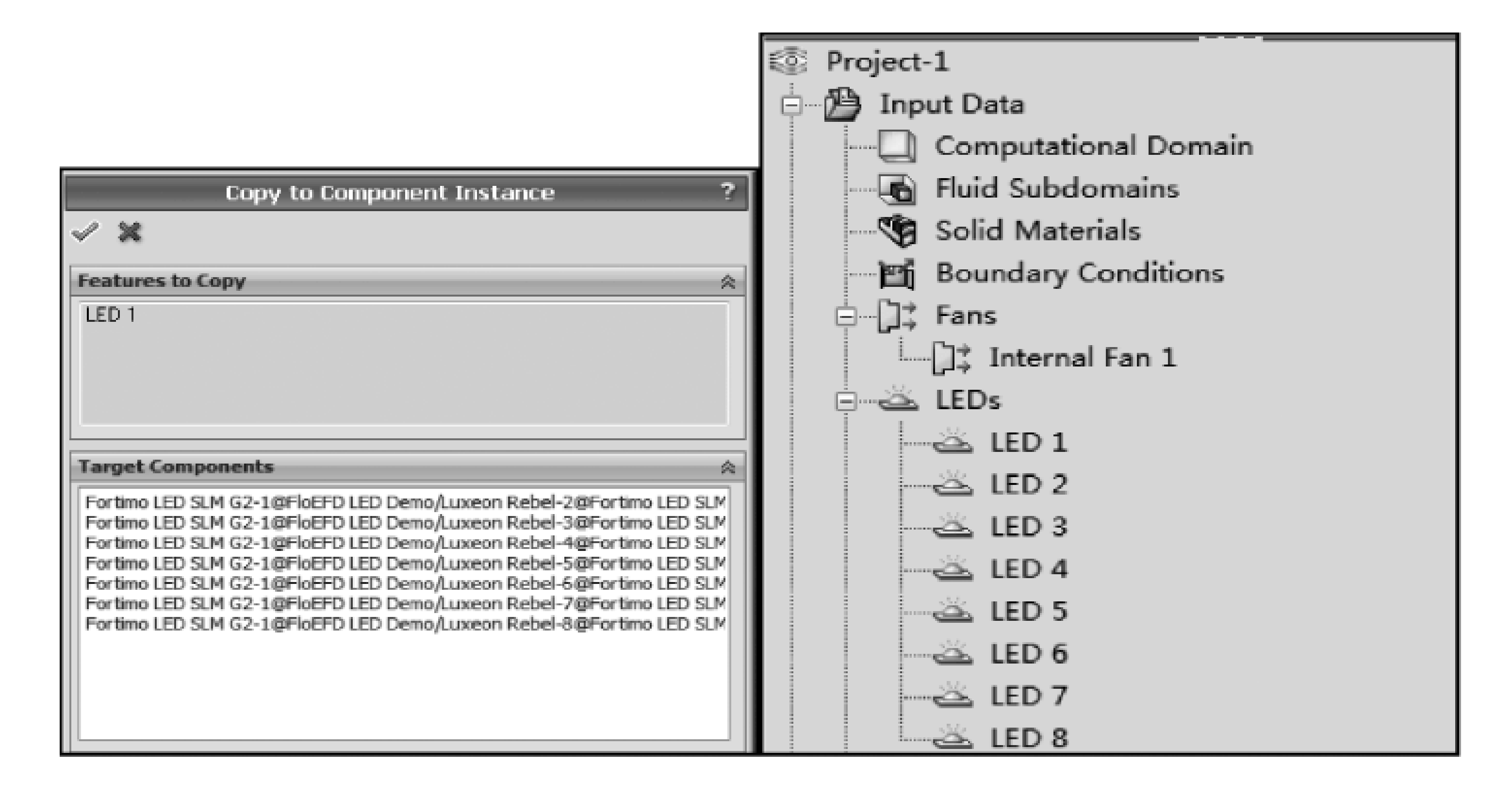


图 11-18 Copy to Component Instance 对话框

4. 创建固体材料

图 11-19 所示为 3M Thermal Tape 8940 的热特性参数。

Thermal Properties	Test	Unit	Value	Test Method
	Thermal Conductivity at 25 °C	W/m*K	0,9	ASTM D 5470
	Coefficient of Thermal Expansion (-40 to 150°C)	mm/°C	140 E -06	TMA

图 11-19 3M Thermal Tape 8940 的热特性参数

选择 Flow Analysis→Tools→Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 设置对话框中，选择 Database tree 下的 Materials→Solids→User Defined。

选择 File→New→New Item，在弹出 Item Properties 页中，双击空白单元格，如图 11-20 所示设置相应的特性值。

定义材料特性如下：

(1) Name：3M Thermal Tape 8940。

(2) Density：1075 kg/m^3。

(3) Specific heat：600 J/(kg * K)。

(4) Conductivity type：Isotropic。

(5) Thermal conductivity：0.9 W/(m * K)。

(6) Melting temperature：363.15K。

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	3M Thermal Tape 8940
Comments	
Density	1075 kg/m^3
Specific heat	600 J/(kg*K)
Conductivity type	Isotropic
Thermal conductivity	0.9 W/(m*K)
Radiation properties	☐
⊟ Melting temperature	☑
Temperature	363.15 K

图 11-20　3M Thermal Tape 8940 的特性值

选择 File→Save。

选择 File→Exit，退出 Engineering Database 设置对话框。完成材料 3M Thermal Tape 8940 的创建。

5. 定义固体材料

右击 FloEFD 模型树中的 Solid Materials，在弹出的菜单中选择 Insert Solid Material。

如图 11-21 所示，在弹出的 Solid Materials 对话框中，选择几何模型树中 TIM 作为 Selection。

选择 User Defined→3M Thermal Tape 8940 作为 Solid。点击 Solid Material 对话框左上角绿色√，退出 Solid Materials 对话框，完成 TIM 材料定义。

采用以上相同方法，为 Heatsink3 的材料定义为 Pre-Defined → Alloys → Aluminum 6061。

采用以上相同方法，为 Luxeon Rebel < 1 >～< 8 >中 Solder 的材料定义为 Pre-Defined→Alloys→Solder (Sn 96.5%/Ag 3.5%)。

选择 File→Save。完成固体材料的定义。

6. 创建 PCB

选择 Flow Analysis→Tools→Engineering Database。

在弹出的 Engineering Database 设置对话框中，选择 Database tree 下的 Printed Circuit Boards→User Defined。

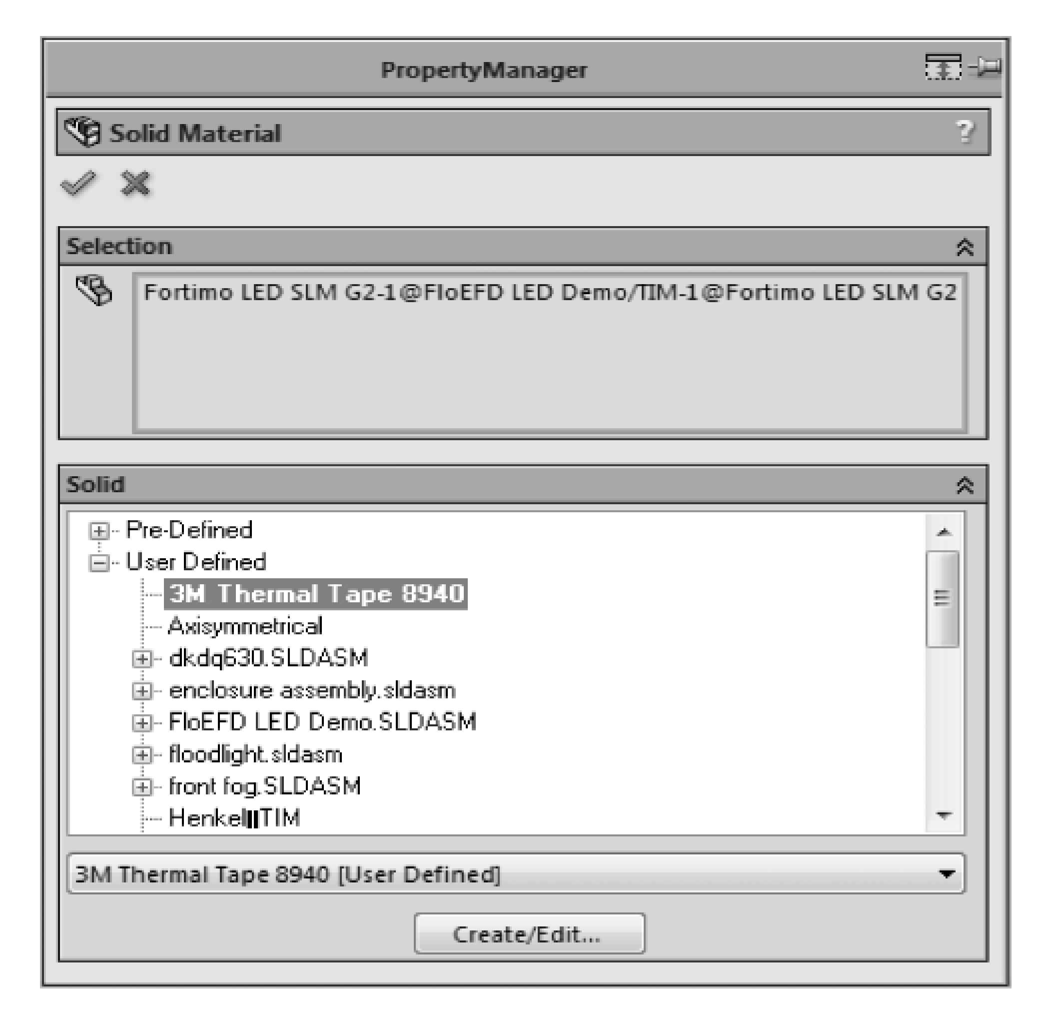


图 11-21　Solid Materials 对话框

选择 File→New→New Item，在弹出的 Item Properties 和 Tables and Curves 页中，如图 11-22 和图 11-23 所示设置相应的特性值。

Items | Item Properties | Tables and Curves

Property	Value
Name	LED MCPCB
Comments	0.25mm Dielectric AL/FR4
Type	Layer Definition
Dielectric material density	1200 kg/m^3
Dielectric material specific heat	880 J/(kg*K)
Dielectric material conductivity	0.3 W/(m*K)
Conductor material density	2689 kg/m^3
Conductor material specific heat	900 J/(kg*K)
Conductor material conductivity	237 W/(m*K)
PCB total thickness	0.0016 m
Conducting layers	(Table)
In-plane (planar) conductivity	198.018469 W/(m*K)
Through-plane (normal) conductivity	1.81001091 W/(m*K)
Effective density	2443.78031 kg/m^3
Effective specific heat	898.382629 J/(kg*K)
Number of conducting layers	1

图 11-22　Item Properties 特性页

选择 File→Save。

选择 File→Exit，退出 Engineering Database 设置对话框。完成 LED MCPCB 板的创建。

7. 定义 PCB

选择 Flow Analysis→Insert→Printed Circuit Board。

如图 11-24 所示，在弹出的 Printed Circuit Board 对话框中，选择几何模型树中 MCPCB 作为 Selection。

选择 LED MCPCB 作为 Printed Circuit Board。单击 Printed Circuit Board 对话框左上角绿色√，退出 Printed Circuit Board 对话框。完成 MCPCB 材料定义。

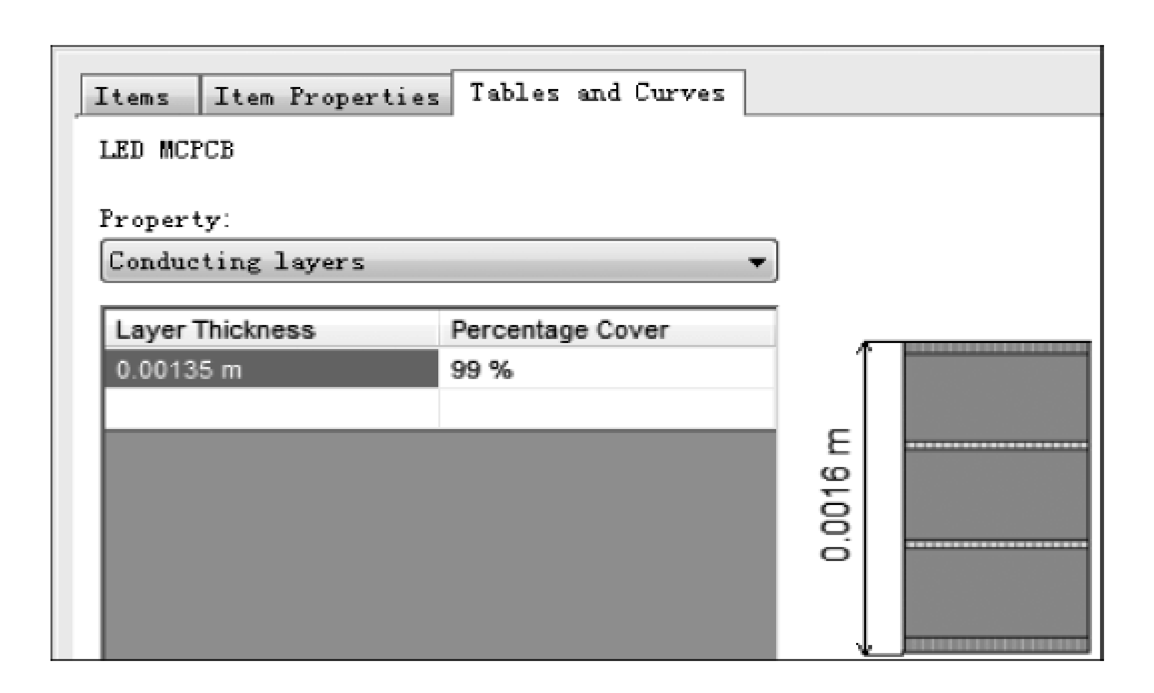


图 11-23　Tables and Curves 特性页

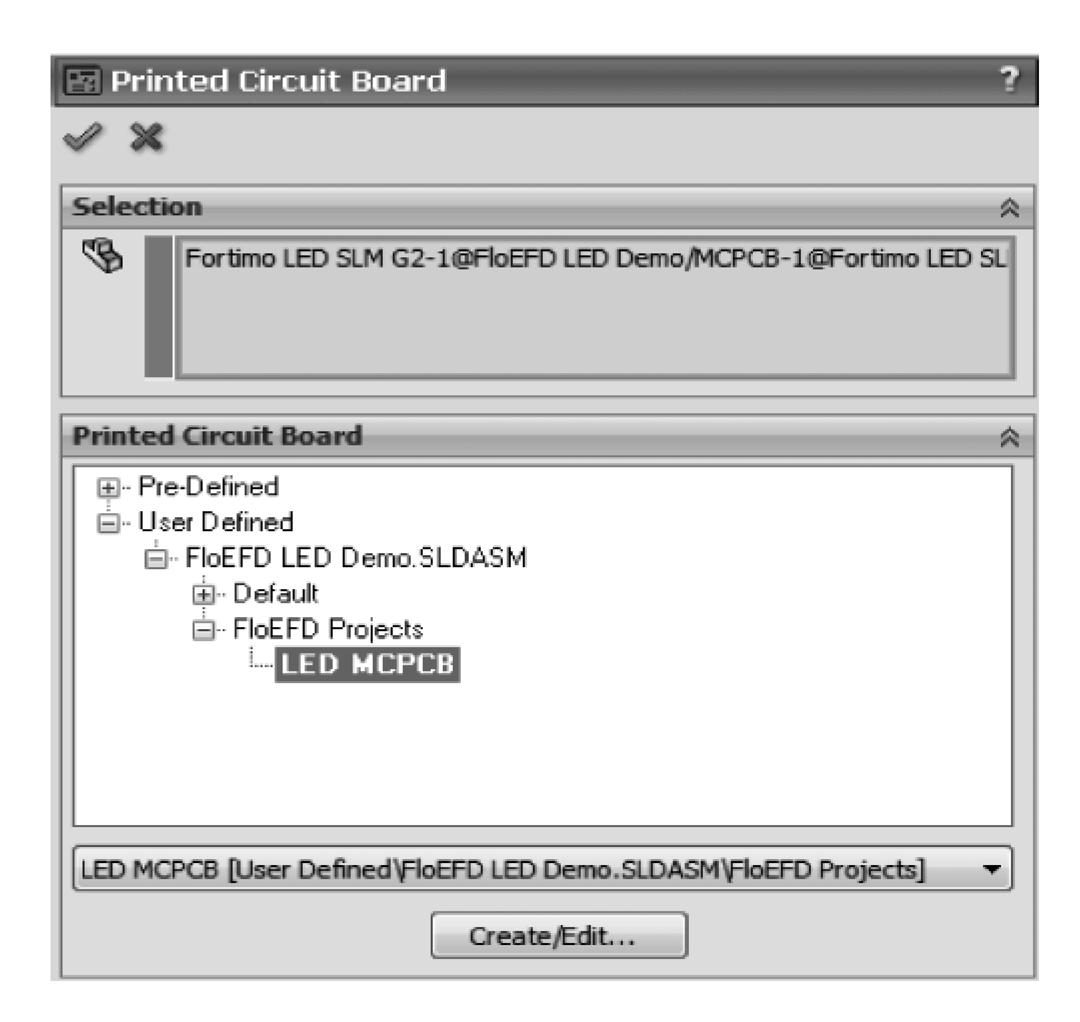
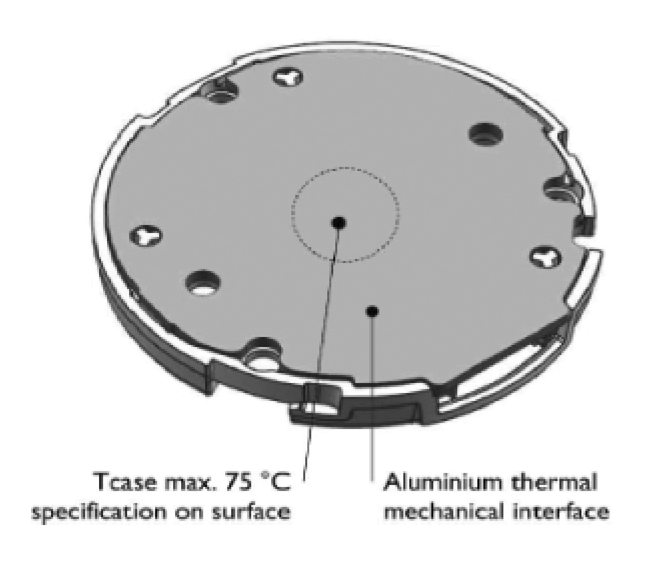


图 11-24　Printed Circuit Board 对话框

8. 定义工程目标

如图 11-25 所示，根据 LED 射灯说明书中的注意事项，金属 PCB 基板（MCPCB 板）的表面温度不允许超过 75℃。



Critical measurement points
Because LEDs are temperature sensitive, LED modules require a different approach with respect to the maximum permissible component temperature. This is different to most other types of light sources.

For LEDs the junction temperature is the critical factor for operation. Since there is a direct relation between the case temperature and the LED junction temperature, it is sufficient to measure the aluminum casing of the LED module at its critical point. The critical point is on the rear surface of the LED module, as shown in the figure on the left. If the case temperature (Tc) at the critical measurement point exceeds the recommended maximum temperature, the performance of the LEDs will be adversely affected, for example in terms of light output, lifetime or lumen maintenance.

图 11-25　LED 射灯说明书注意事项

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，在弹出的菜单中选择 Insert Surface Goal。如图 11-26 所示，弹出 Surface Goals 对话框。

如图 11-27 所示，选择 Face < 1 >@Fortimo LED SLM G2-1/MCPCB-1 作为 Selection。

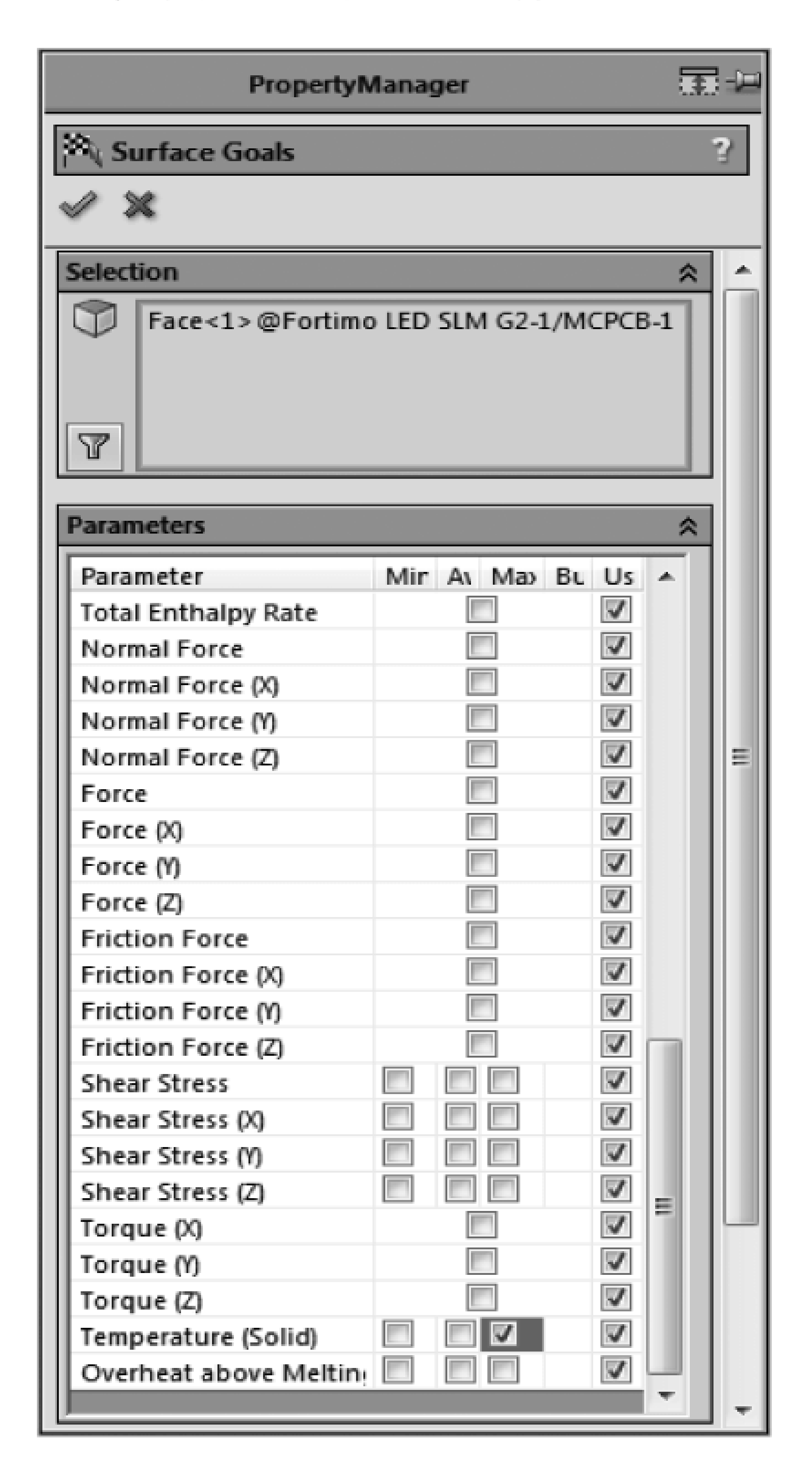


图 11-26　Surface Goals 对话框

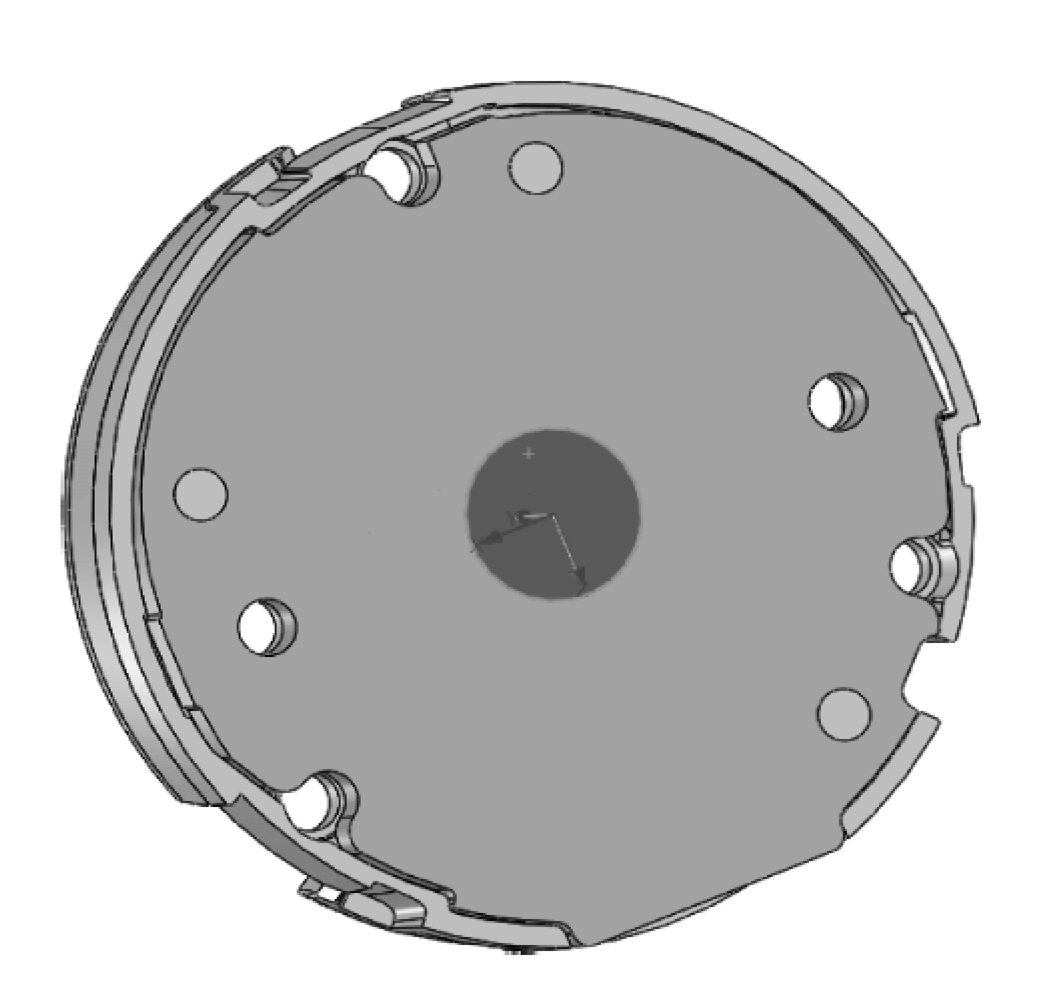


图 11-27　Face < 1 >@Fortimo LED SLM G2-1/MCPCB-1 示意图

在 Parameter 中，勾选 Temperature(Solid)的 Max。

单击 Surface Goal 对话框左上角绿色√，退出 Surface Goal 对话框。

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，在弹出的菜单中选择 Insert Surface Goal。

如图 11-28 所示，选择 Face < 1 >@LED Cooler-1/FloEFD Fan-1 作为 Selection。

如图 11-29 所示，在 Parameters 中，勾选 Volume Flow Rate。

单击 Surface Goals 对话框左上角绿色√，退出 Surface Goals 对话框。

右击 FloEFD 模型树中的 Goals，在弹出的菜单中选择 Insert Volume Goal。

如图 11-30 所示，在 Volume Goals 窗口中选择 Luxeon Rebel < 1 >@Luxeon Rebel < 1 >作为 Selection。

如图 11-31 所示，在 Parameters 中，勾选 Temperature(Solid)选项中的 Maximum Value。

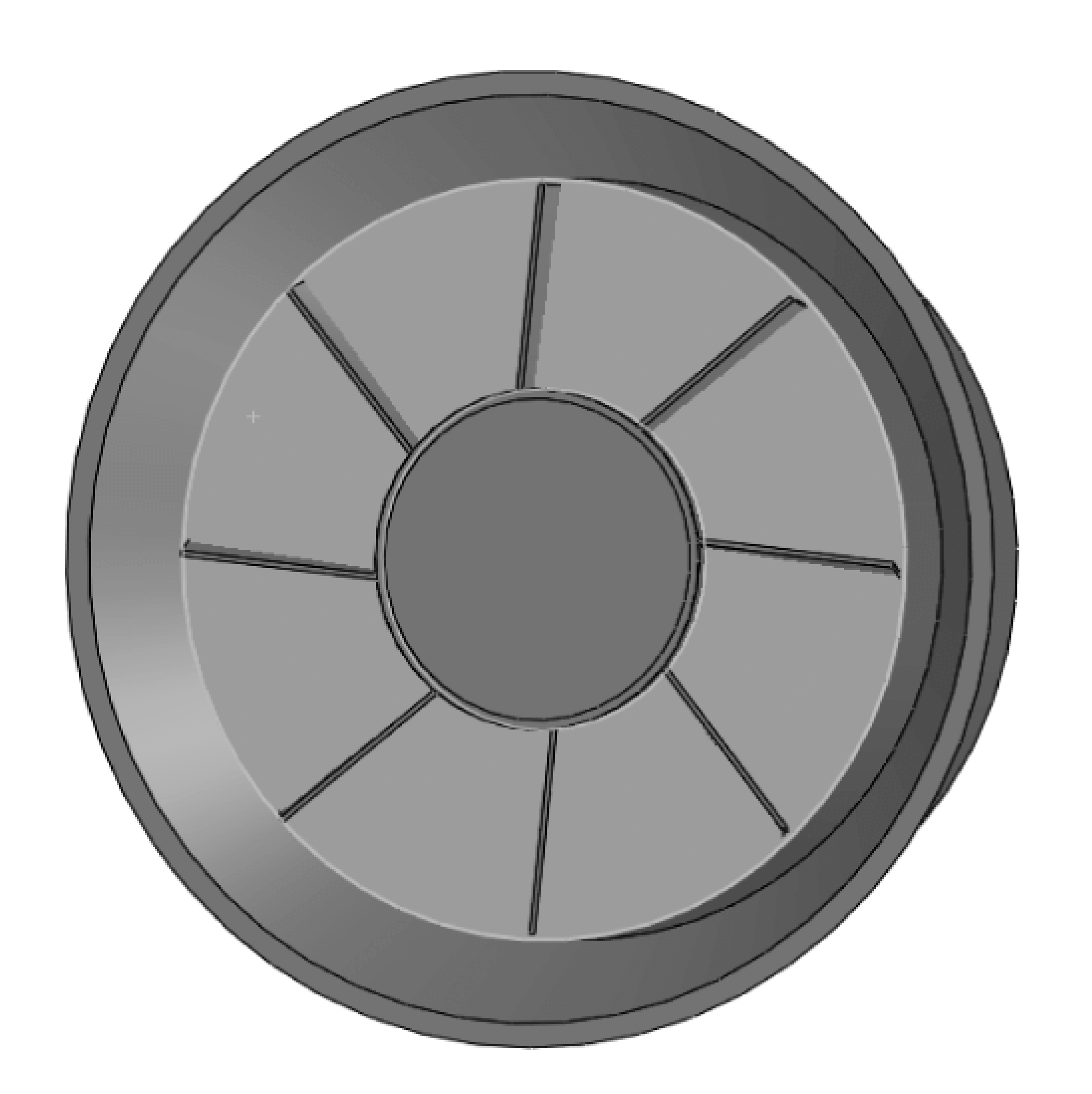


图 11-28　Face < 1 >@LED Cooler-1/FloEFD Fan-1 示意图

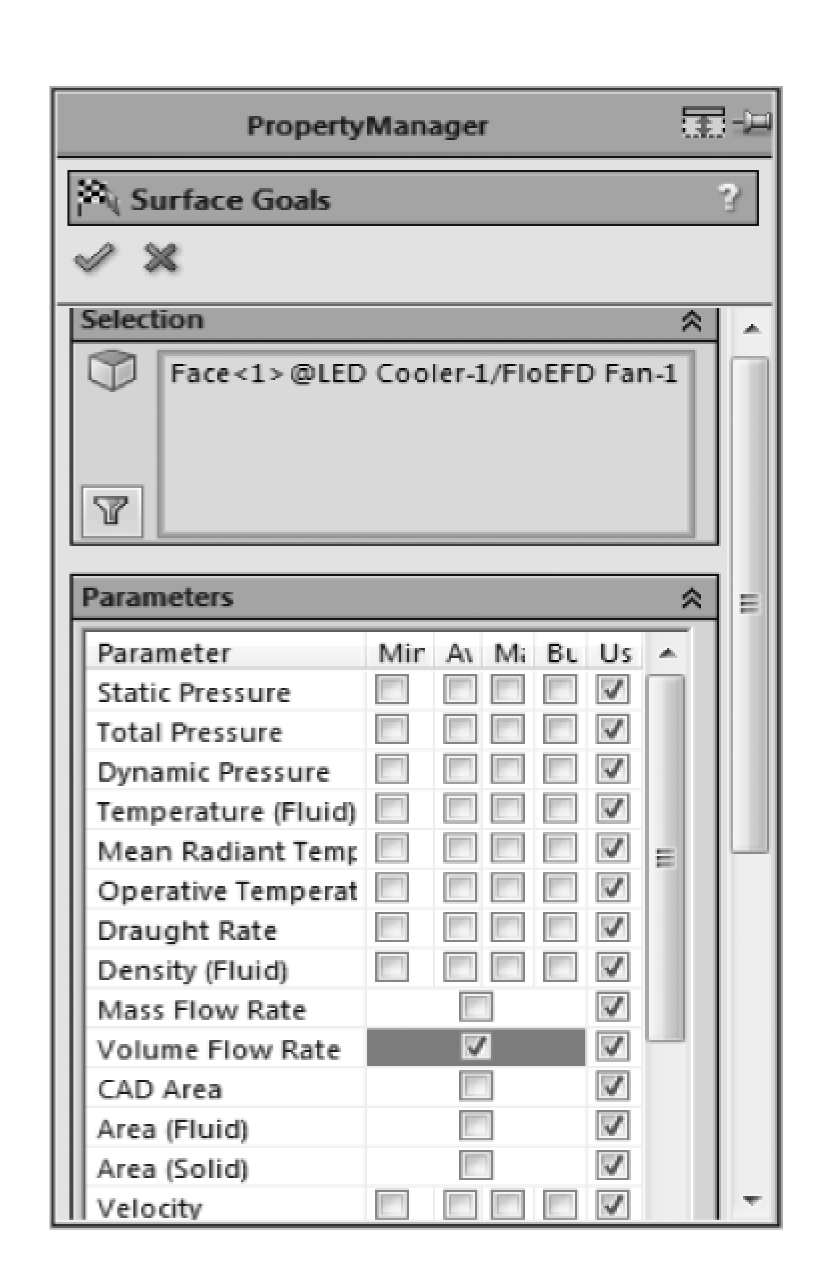


图 11-29　Surface Goals 对话框

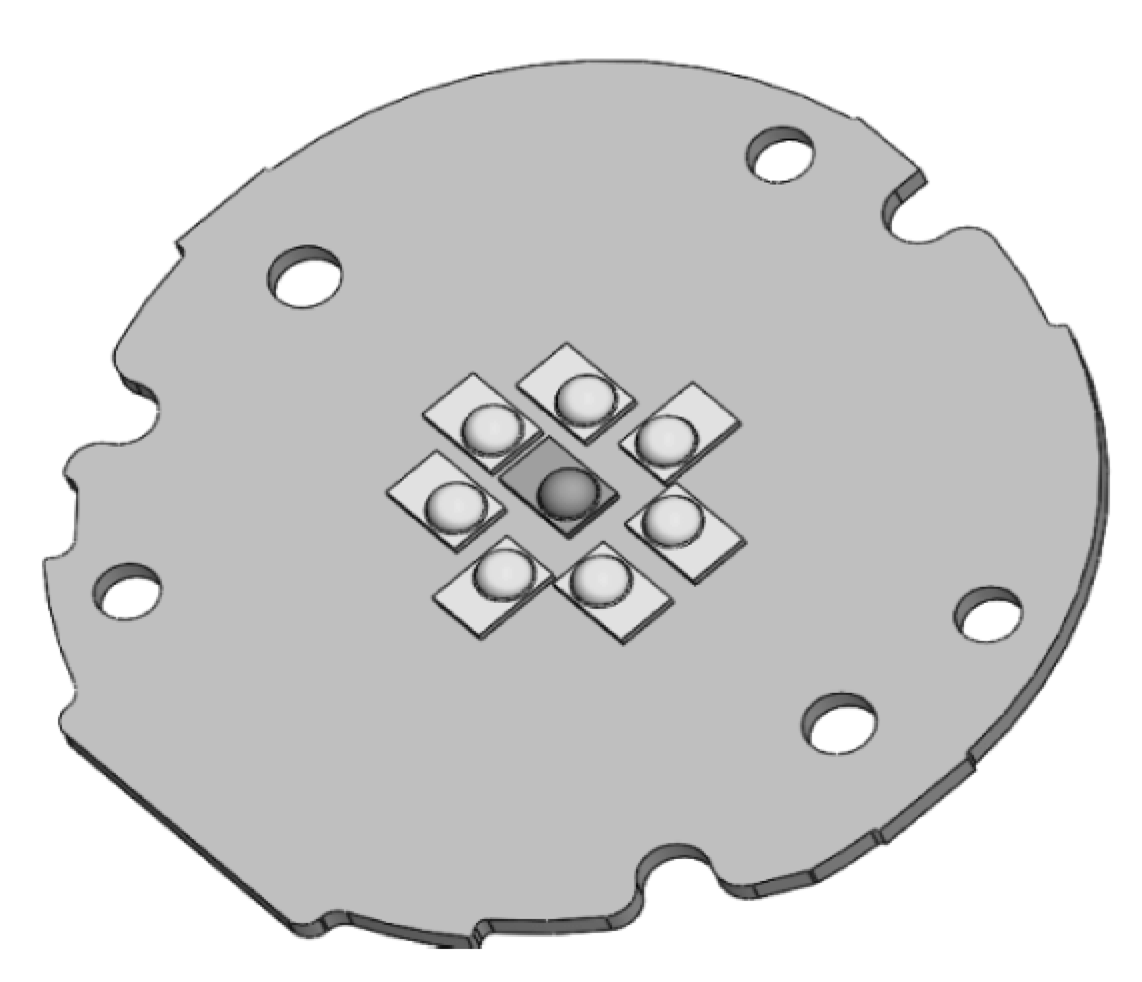


图 11-30　Luxeon Rebel < 1 >@Luxeon Rebel < 1 >示意图

单击 Volume Goals 对话框左上角绿色√，退出 Volume Goals 对话框。

采用以上相同方法，分别将 Luxeon Rebel < 2 >～< 8 >的 Luxeon Rebel < 1 >作为 Selection。勾选 Parameters 中的 Temperature(Solid)选项中的 Maximum Value。创建相应的体积目标。如图 11-32 所示，更改所有工程目标的名称。

PropertyManager

Volume Goals

Selection

Fortimo LED SLM G2-1@FloEFD LED Demo

Parameters

Parameter	Min	Av	Max	Bu	Us
Mean Radiant Tempe	☐	☐	☐	☐	☑
Operative Temperatu	☐	☐	☐	☐	☑
Draught Rate	☐	☐	☐	☐	☑
Density (Fluid)	☐	☐	☐	☐	☑
Mass (Fluid)		☐			☑
CAD Volume		☐			☑
Volume (Fluid)		☐			☑
Volume (Solid)		☐			☑
Velocity	☐	☐	☐	☐	☑
Velocity (X)	☐	☐	☐	☐	☑
Velocity (Y)	☐	☐	☐	☐	☑
Velocity (Z)	☐	☐	☐	☐	☑
Mach Number	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulent Viscosity	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulent Time	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulence Length	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulence Intensity	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulent Energy	☐	☐	☐	☐	☑
Turbulent Dissipation	☐	☐	☐	☐	☑
Temperature (Solid)	☐	☐	☑	☐	☑
Overheat above Melt	☐	☐	☐		☑
Mass (Solid)		☐			☑

图 11-31 Volume Goals 对话框

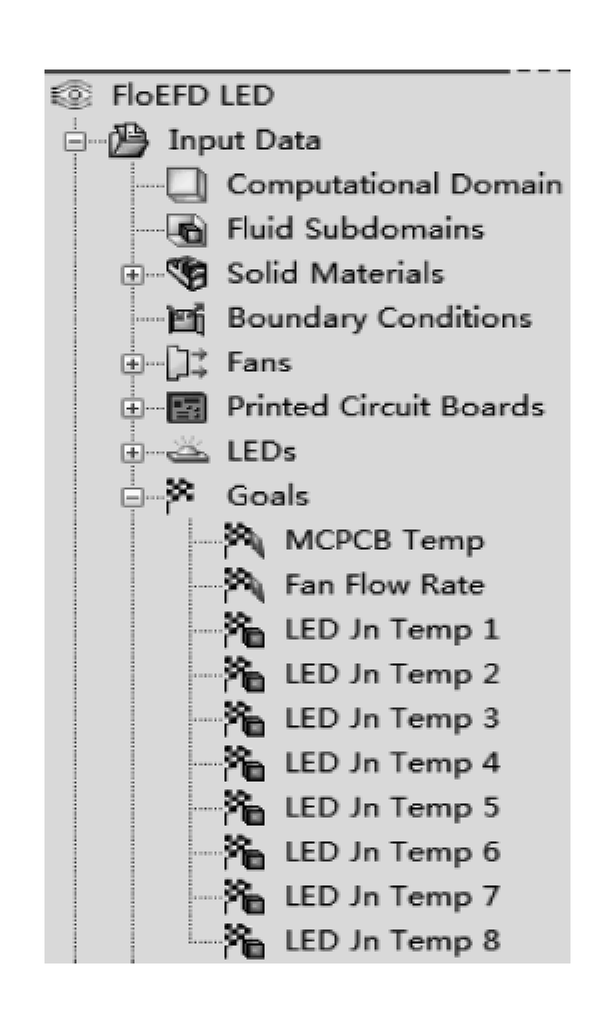


图 11-32 FloEFD 模型树

11.2.4 网格设置

如图 11-33 所示，右击 FloEFD 模型树中的 Global Mesh，选择 Edit Definition。

在弹出的 Global Mesh Settings 对话框中，如图 11-34 所示，设置 Basic Mesh 和 Advanced Refinement。单击 Global Mesh Settings 对话框左上角绿色√，退出 Global Mesh Settings 对话框。

单击 Flow Analysis→Insert→Local Initial Mesh，如图 11-35 所示，在弹出的 Local Mesh Settings 对话框中，选择 Fortimo LED SLM G2-1/Luxeon Rebel-1～8 作为应用 Local initial mesh。

单击 Local Mesh Settings 对话框右上角绿色√，退出 Local Mesh Settings 对话框。

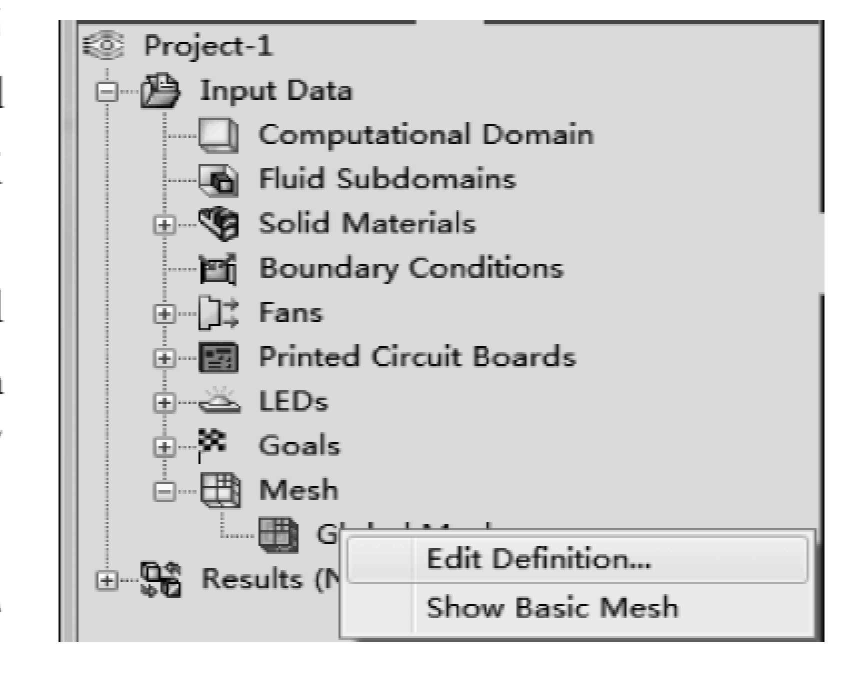


图 11-33 FloEFD 模型树

单击 Flow Analysis→Insert→Local Initial Mesh，如图 11-36 所示，在弹出的 Local Mesh Settings 对话框中，选择 Fortimo LED SLM G2-1/Luxeon Rebel-1～8/Solder-1 作为应用 Local initial mesh。

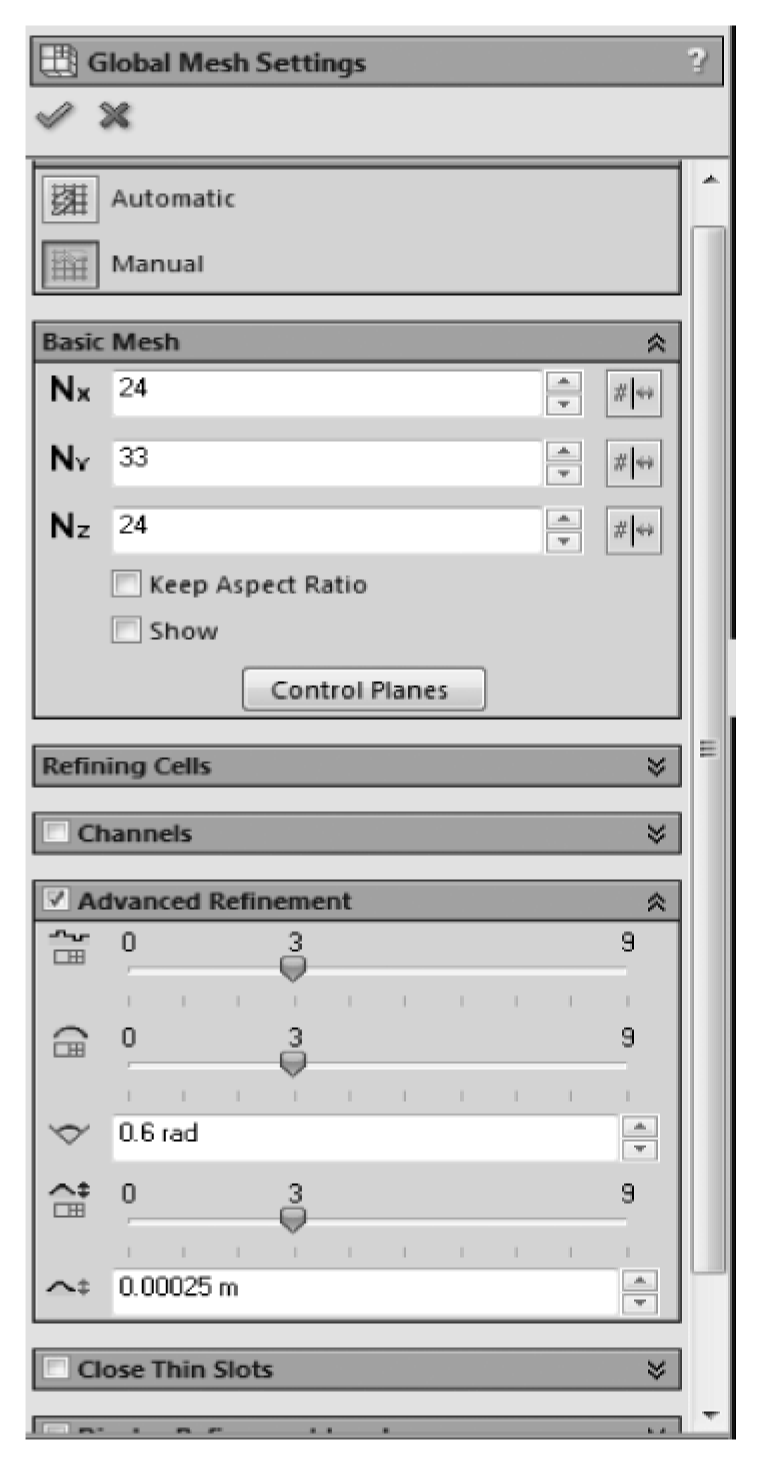


图 11-34　Global Mesh Settings 对话框

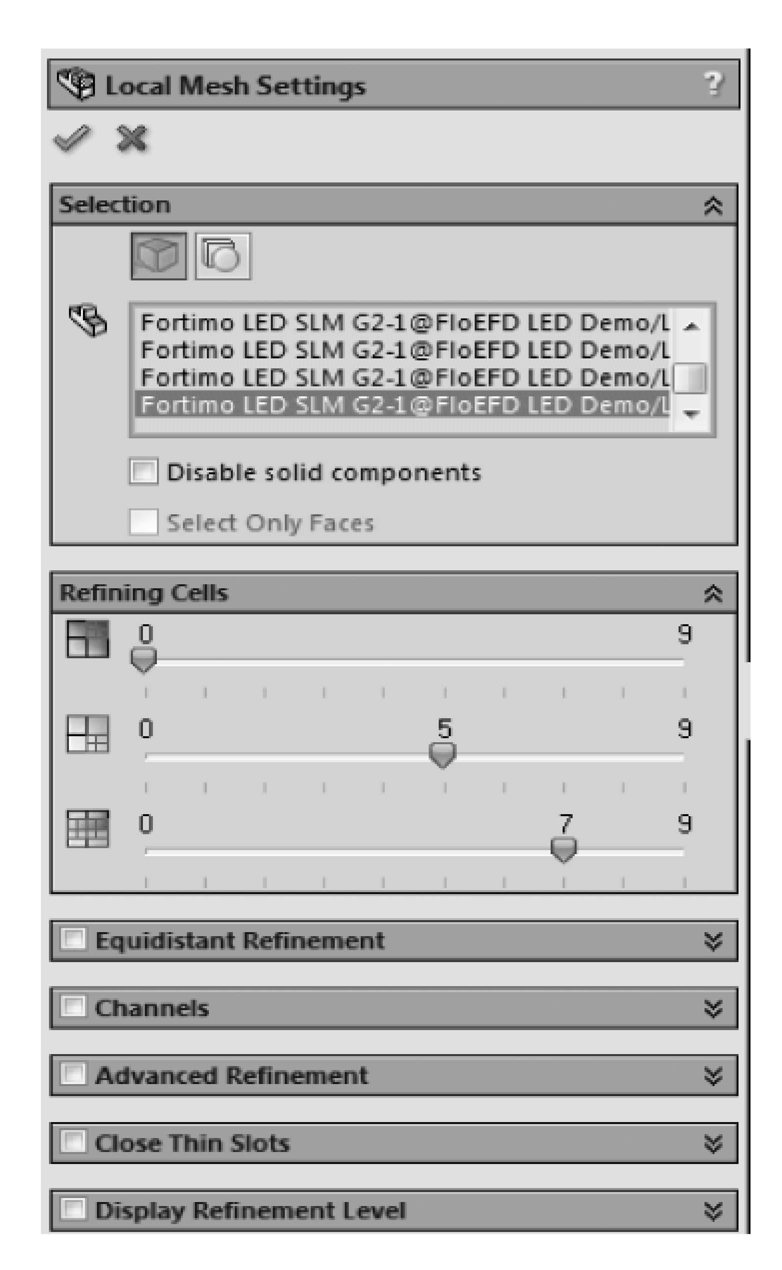


图 11-35　Local Initial Mesh 设置

单击 Local Mesh Settings 对话框右上角绿色√，退出 Local Mesh Settings 对话框。

11.2.5　求解计算

（1）单击 Flow Analysis→Solve→Run。如图 11-37 所示，设置求解计算选项。其中 CPU and Memory Usage 中的 Use 确定了参与计算的 CPU 核数，可根据实际计算机配置进行调整。

（2）单击 Run 对话框中的 Run，Project-1 项目进行求解计算。

11.2.6　仿真结果分析

1. 查看 LED 仿真结果

如图 11-38 所示，在图形显示区域仅显示(f)Fortimo LED SLM G2＜1＞。

如图 11-39 所示，在 FloEFD 模型树中依次选择 8 个 LED 图标，在图形显示区域会显示每一个 LED 的仿真结果。其中仿真结果包括了 LED 的结温、热功耗以及光通量。按住鼠标左键进行拖曳，可以改变 LED 仿真结果显示的位置。

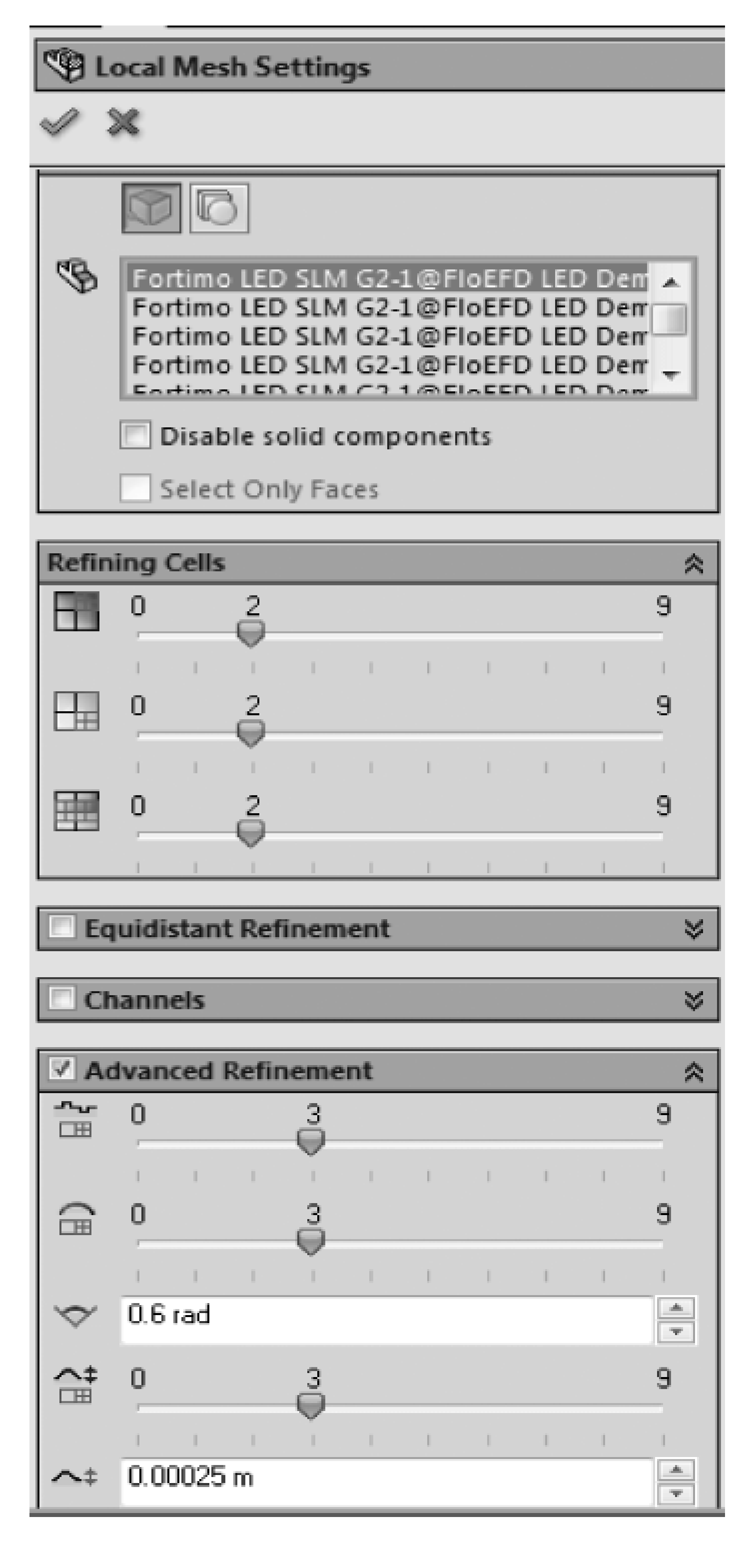


图 11-36　Local MeshSettings 对话框

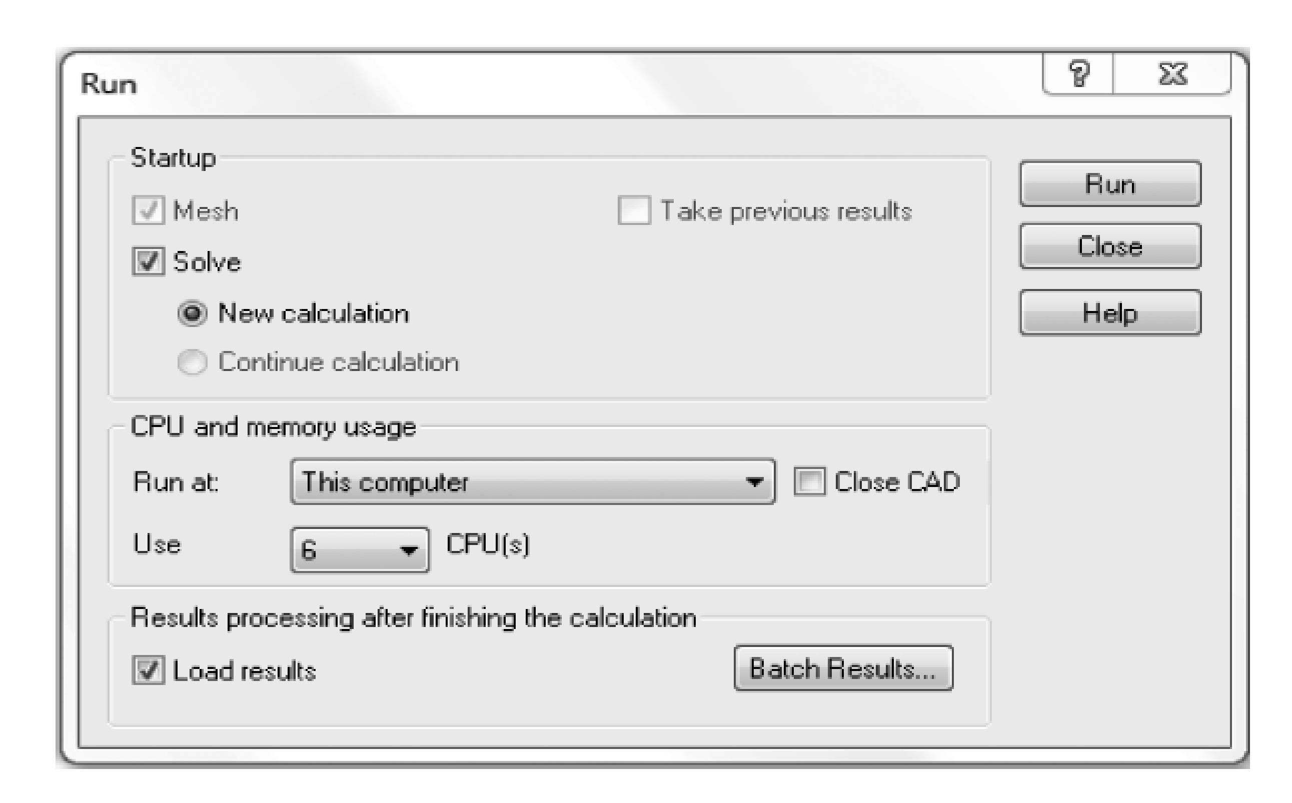


图 11-37　Run 求解对话框

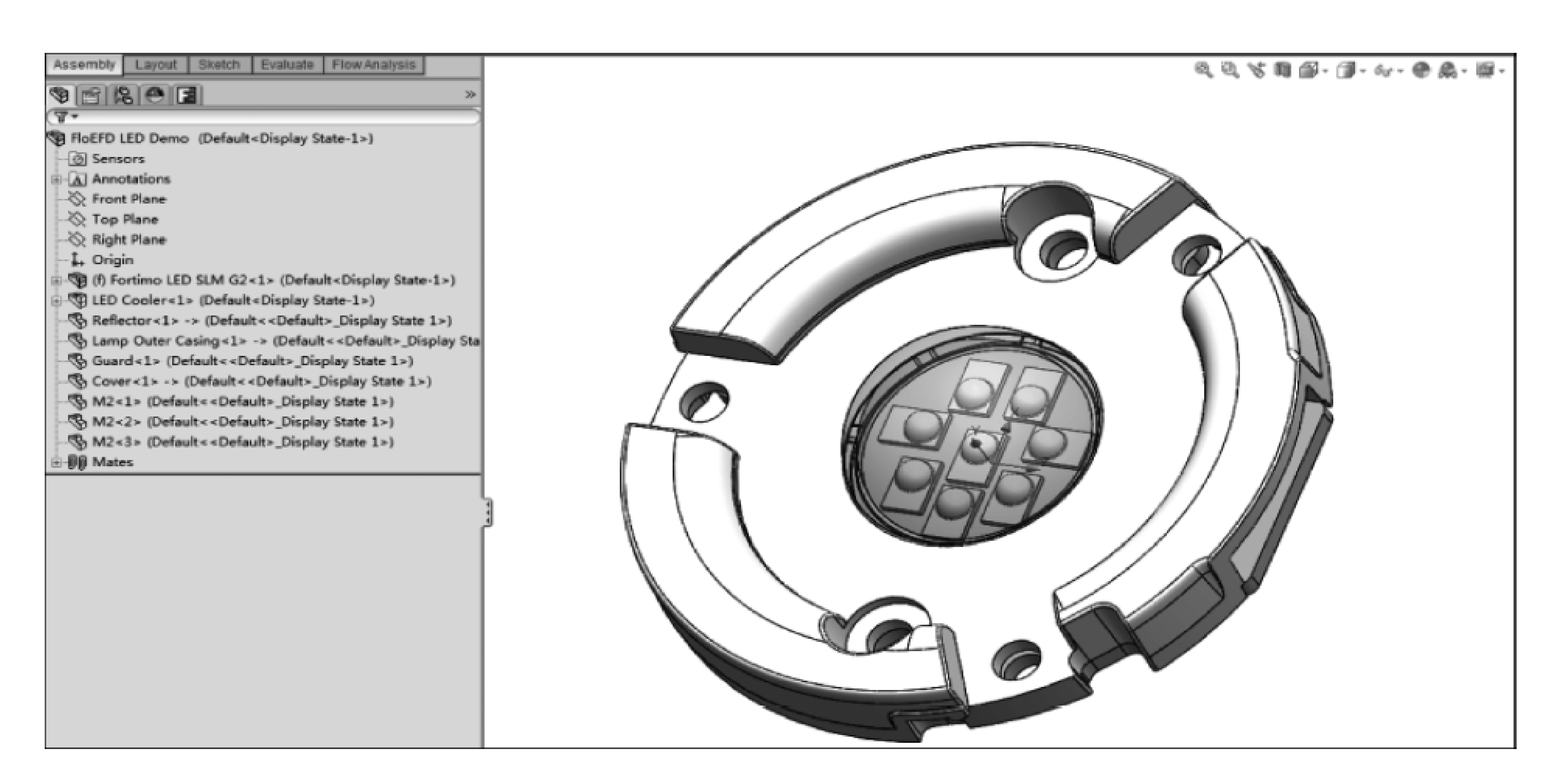


图 11-38　(f)Fortimo LED SLM G2 <1>

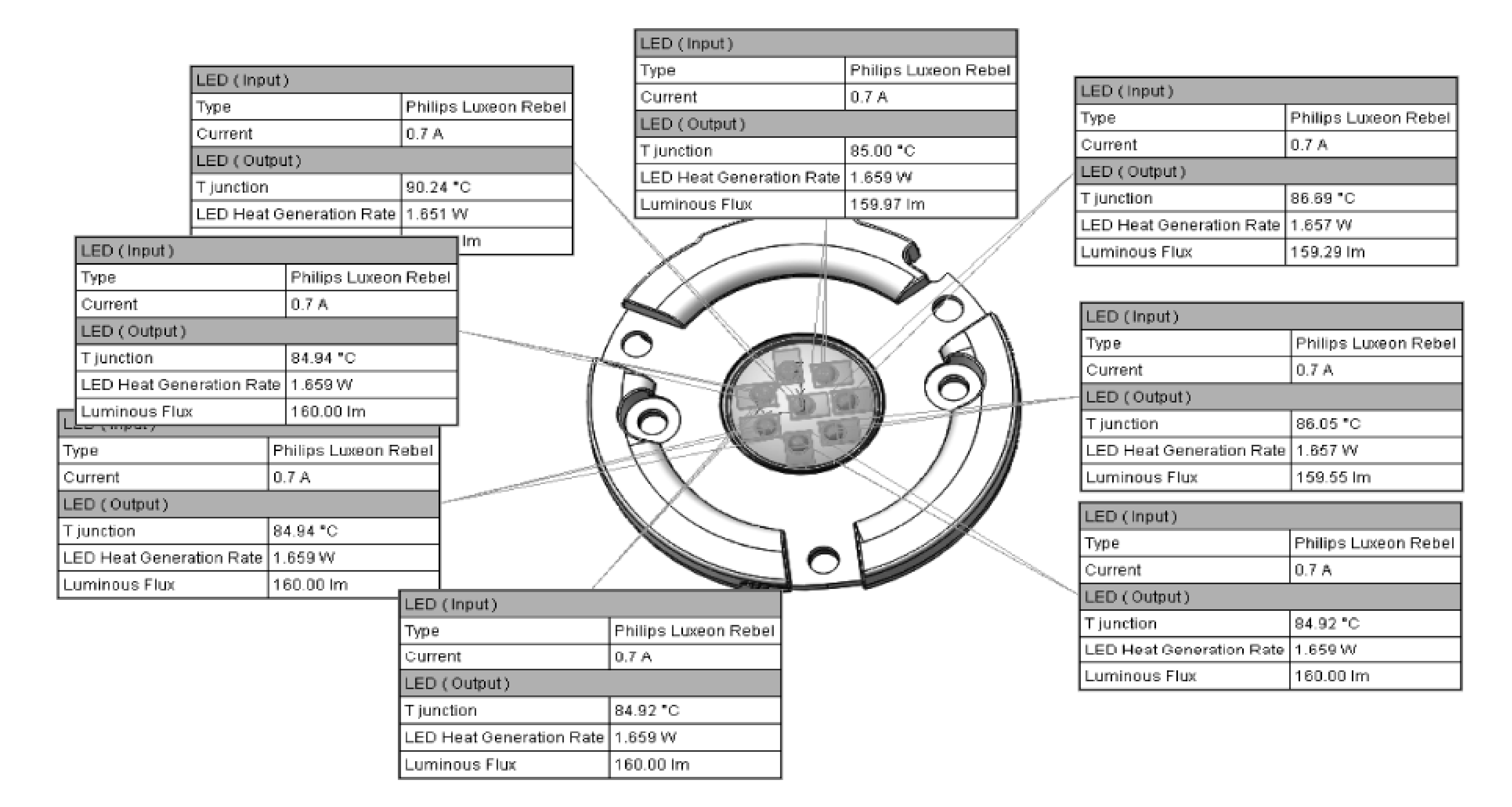


图 11-39　LED 仿真结果

单击图形显示区域的空白处,退出 LED 仿真结果查看。

2. 查看目标

如图 11-40 所示,右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Goal Plots,并且选择 Insert。

如图 11-41 所示,在弹出的 Goal Plot 对话框中,勾选 All,并且勾选 Options 的 Group Charts by parameter。

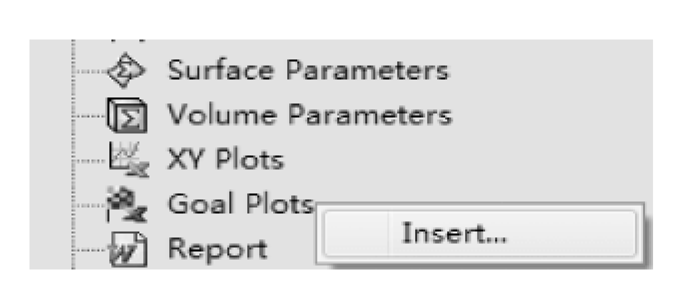


图 11-40　FloEFD 模型树

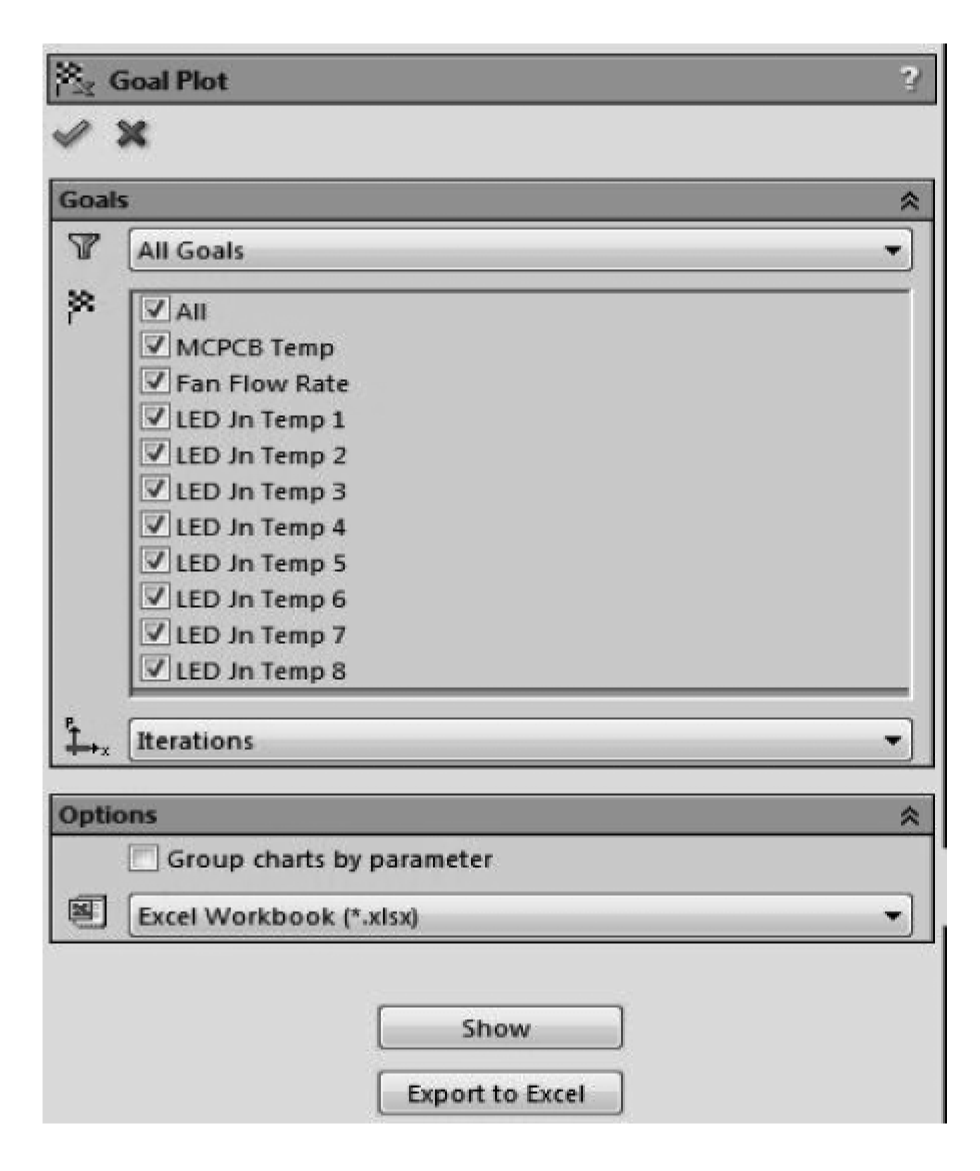


图 11-41　Goal Plot 对话框

单击 Show，如图 11-42 所示显示工程目标结果值和结果计算曲线。其中金属 PCB 基板（MCPCB 板）的目标温度为 35.1℃，符合 LED 射灯的热设计要求。LED 器件的结温均低于 95℃。

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria
MCPCB Temp	[° C]	35.09	35.08	35.05	35.10	100	Yes	0.04	0.30
LED Jn Temp 1	[° C]	90.24	90.22	90.17	90.25	100	Yes	0.08	1.33
LED Jn Temp 2	[° C]	86.69	86.67	86.61	86.70	100	Yes	0.08	1.25
LED Jn Temp 3	[° C]	86.05	86.03	85.98	86.06	100	Yes	0.08	1.22
LED Jn Temp 4	[° C]	85.00	84.98	84.93	85.01	100	Yes	0.08	1.20
LED Jn Temp 5	[° C]	84.94	84.92	84.88	84.95	100	Yes	0.08	1.21
LED Jn Temp 6	[° C]	84.94	84.92	84.87	84.95	100	Yes	0.08	1.21
LED Jn Temp 7	[° C]	84.92	84.90	84.86	84.93	100	Yes	0.08	1.20
LED Jn Temp 8	[° C]	84.92	84.91	84.86	84.93	100	Yes	0.08	1.20
Fan Flow Rate	[m^3/s]	0.0029	0.0029	0.0029	0.0029	100	Yes	1.9651e-006	7.0040e-005

图 11-42　工程目标结果值

单击 Goal Plot 对话框左上角绿色√，退出 Goal Plot 对话框。

3．流动迹线

如图 11-43 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Flow Trajectories，并且选择 Insert。

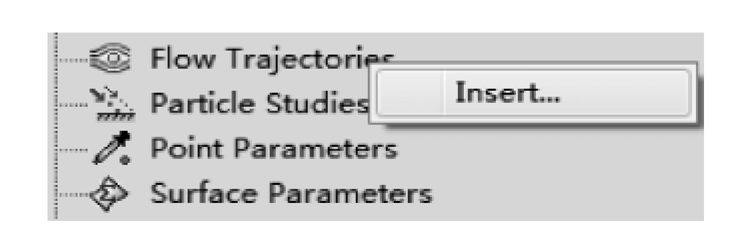


图 11-43　FloEFD 模型树

如图 11-44 所示，在弹出的 Flow Trajectories 对话框中选择 Face<1>@LED Cooler-1/FloEFD Fan-1 作为粒子迹线的起始面。其中 Number of Points 设置为 50，并且单击 Adjust Minimum/Maximum and Number of Levels 图标设置 Reset to Plot Maximum 和 Reset to Plot Minimum 选项。

单击 Flow Trajectories 对话框左上角绿色√，退出 Flow Trajectories 对话框。

如图 11-45 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Flow Trajectories1，在弹出的菜单中选择 Play。图 11-46 所示图形显示区域为 LED 射灯周围的空气流动迹线。

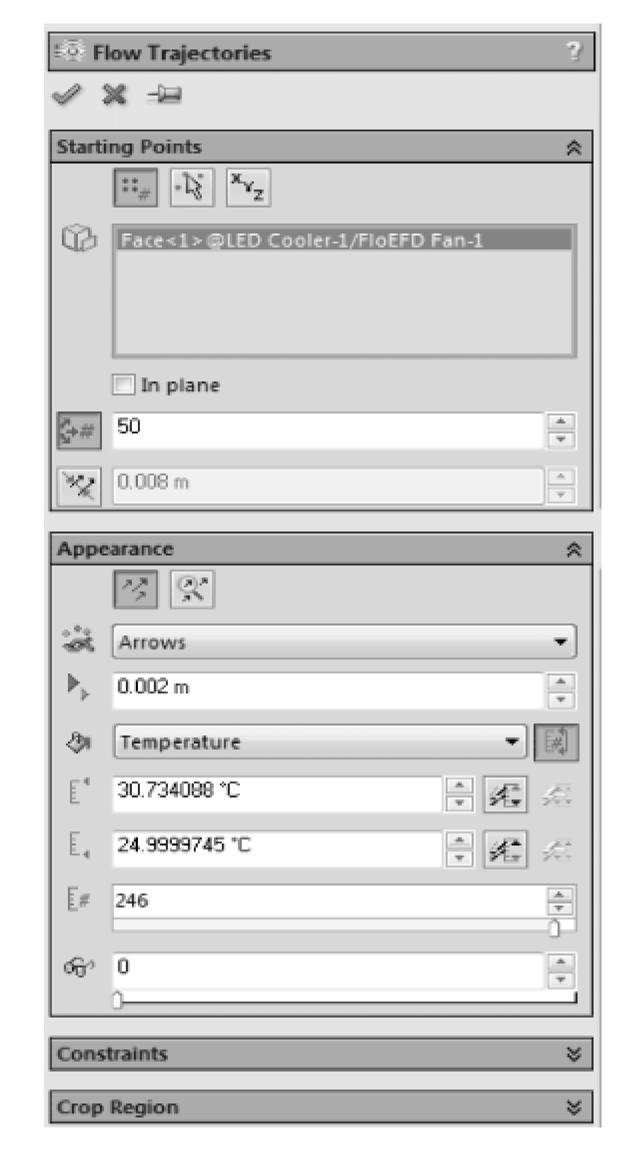


图 11-44　Flow Trajectories 对话框

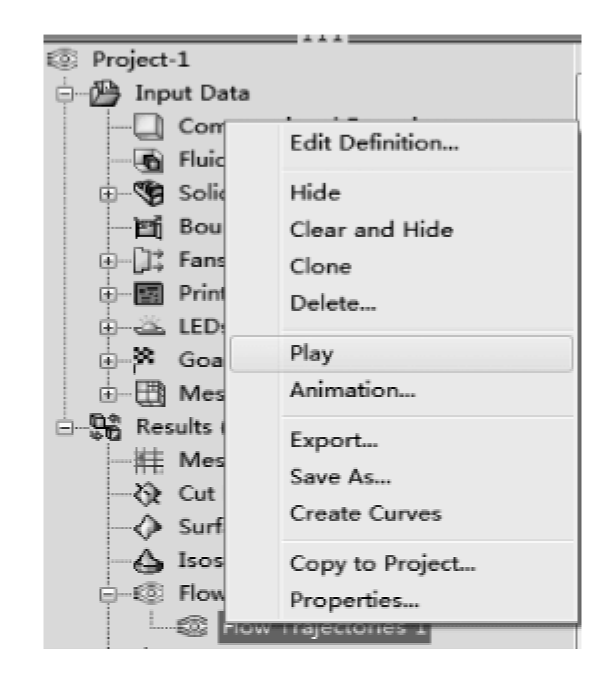


图 11-45　FloEFD 模型树

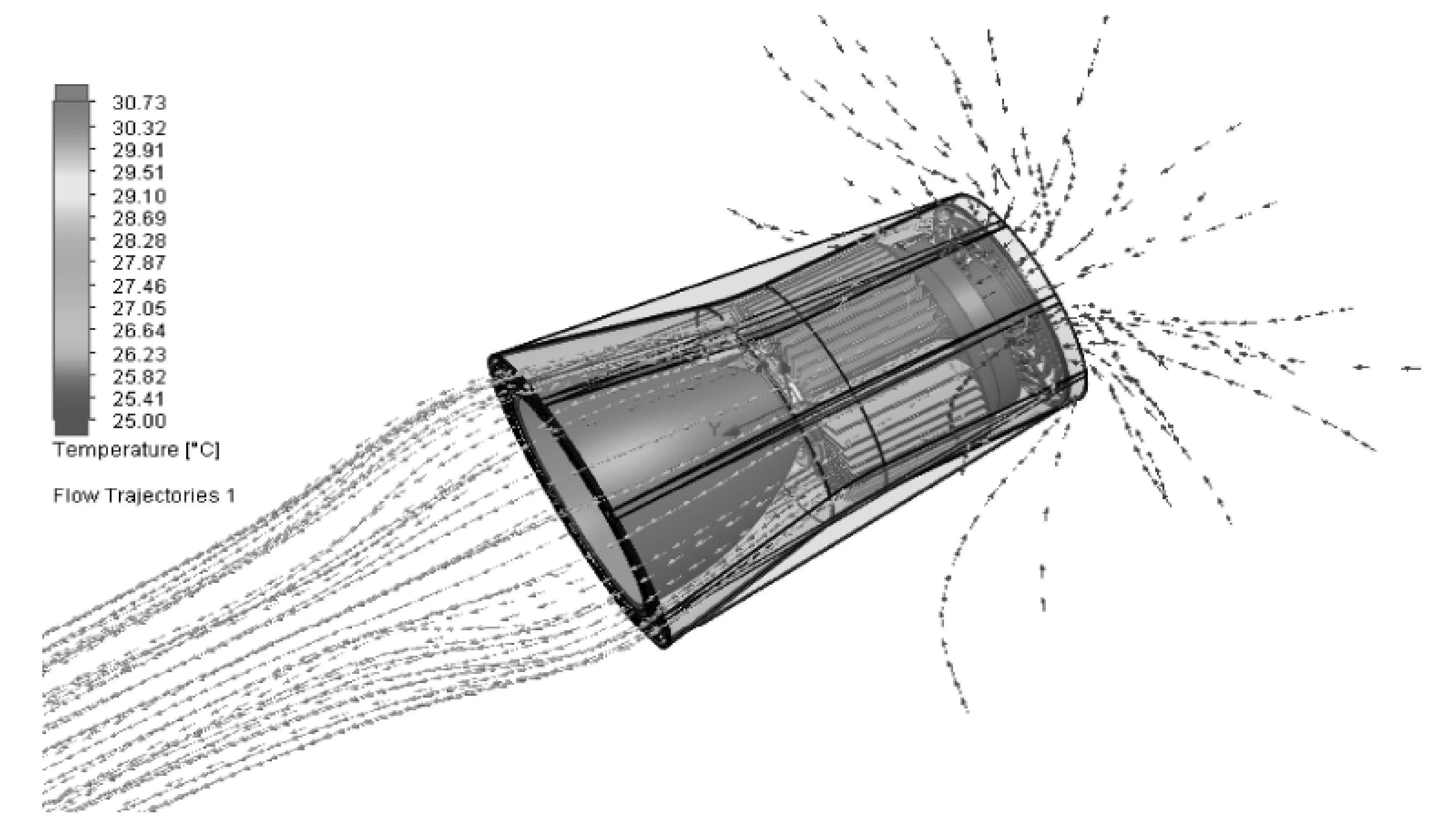


图 11-46　LED 射灯周围空气流动迹线

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Flow Trajectories1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏粒子流动迹线。

4. 表面云图

如图 11-47 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Surface Plots，并且选择 Insert。

如图 11-48 所示，在弹出的 Surface Plot 对话框中，选择 LED Cooler-1@FloEFD LED Demo/Heatsink3-1@LED Cooler 作为 Selection。并且 Contours 选择 Temperature (Solid)。单击 Adjust Minimum and Maximum 图标，展开表面温度云图上下限设置选项。通过 Reset to Plot Maximum 和 Reset to Plot Minimum 设置选项，调整温度云图的上下限。

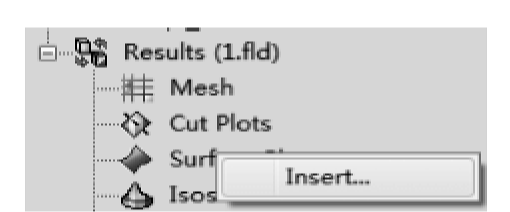


图 11-47　FloEFD 模型树

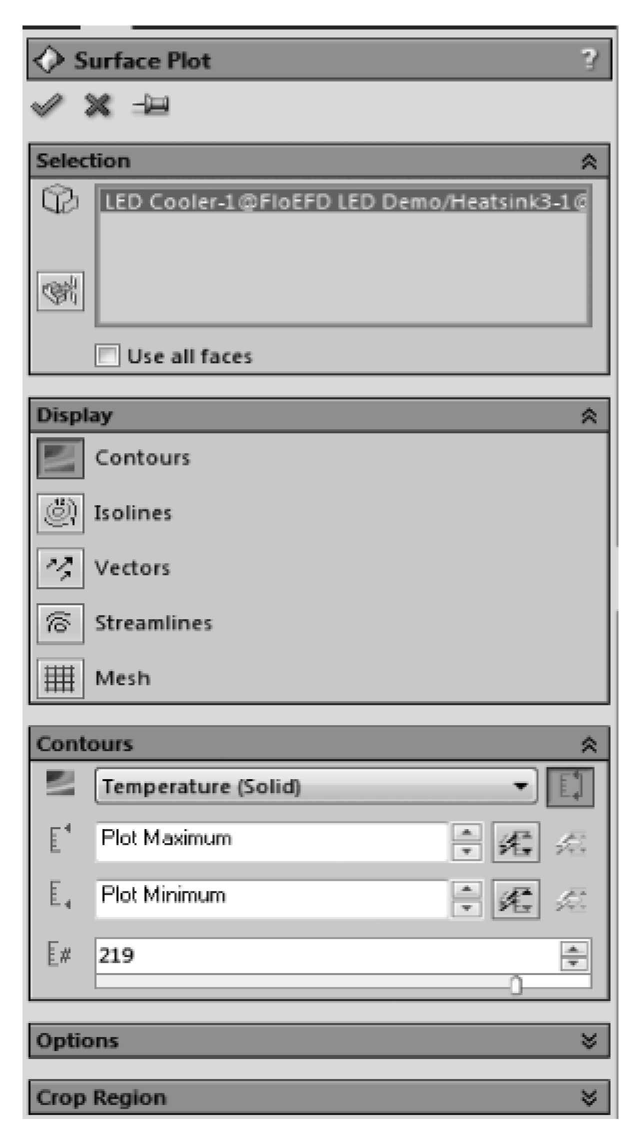


图 11-48　Surface Plot 对话框

单击 Surface Plot 对话框左上角绿色√，退出 Surface Plot 对话框。如图 11-49 所示为模型显示区域散热器表面的温度云图。

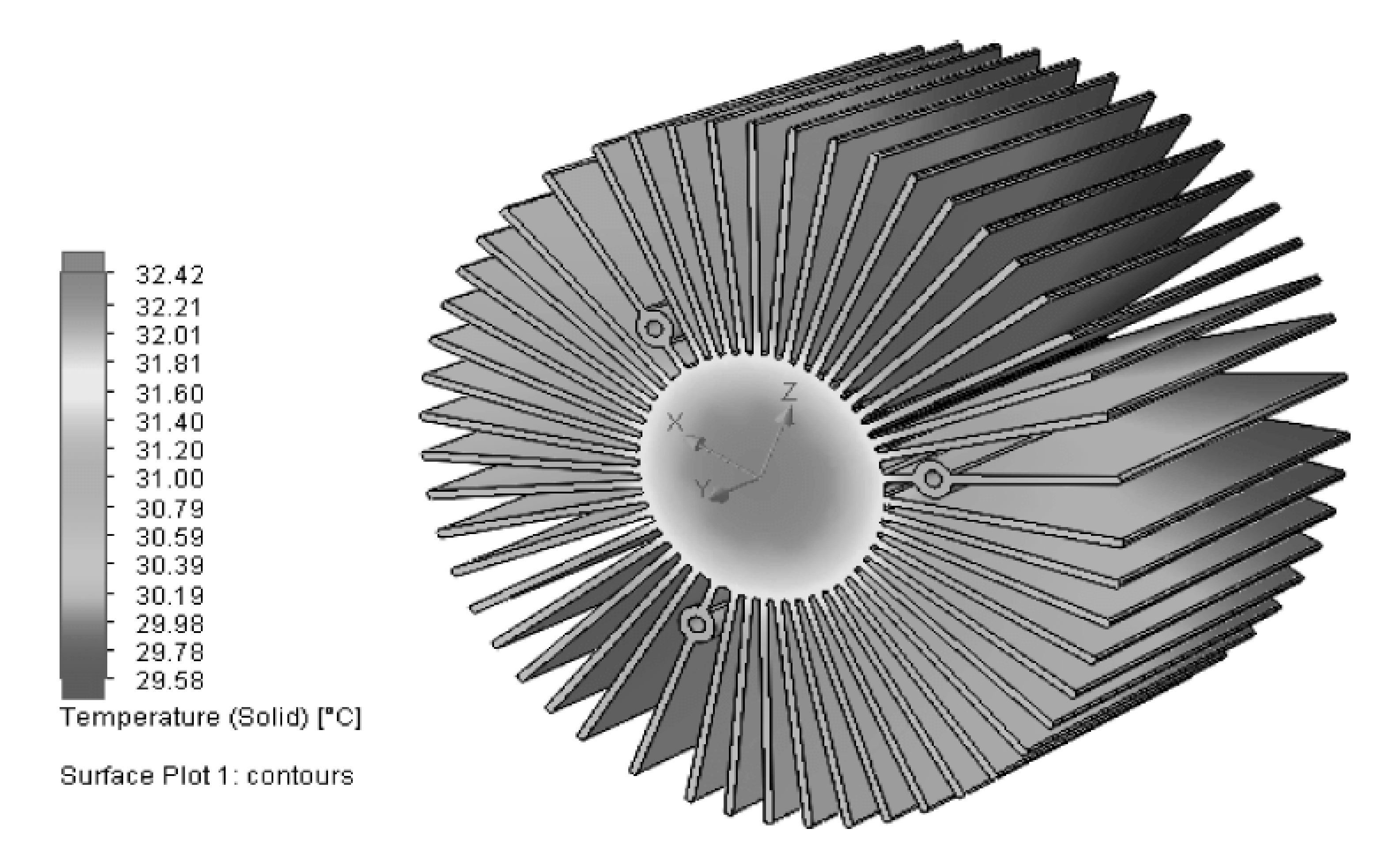


图 11-49　散热器表面温度云图

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Surface Plot1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏散热器表面温度云图。

5. 切面云图

如图 11-50 所示，右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plots，并且选择 Insert。

如图 11-51 所示，在弹出的 Cut Plot 对话框中，选择 Front Plane 作为 Selection，并且 Contours 选择 Temperature。

单击 Cut Plot 对话框左上角绿色√，退出 Cut Plot 对话框。单击 View→Display→Wireframe 命令。图 11-52 所示为模型显示区域散热器表面的温度云图。

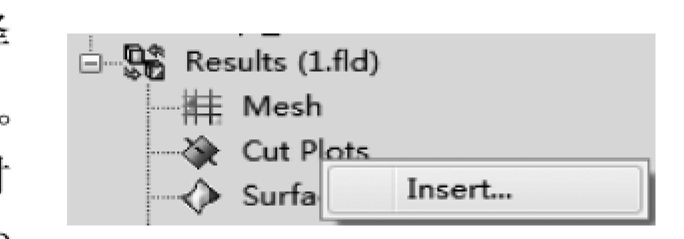


图 11-50　FloEFD 模型树

右击 FloEFD 模型树中 Results 下的 Cut Plot1，在弹出的菜单中选择 Hide，隐藏切面温度云图。

11.2.7　优化设计

选择 Flow Analysis→Solve→New Parametric Study。如图 11-53 所示，首先双击模型树中 Heatsink3 <1>下的 Boss-Extrude1，使图形显示区域出现散热器高度尺寸和中间圆柱体尺寸。并且单击 New Parametric Study 区域的 Add Dimension Parameter 图标。

弹出 Add Parameter 对话框之后，选择图形显示区域的 52.50，并且单击 Add Parameter 对话框右下角的√，退出 Add Parameter 对话框。

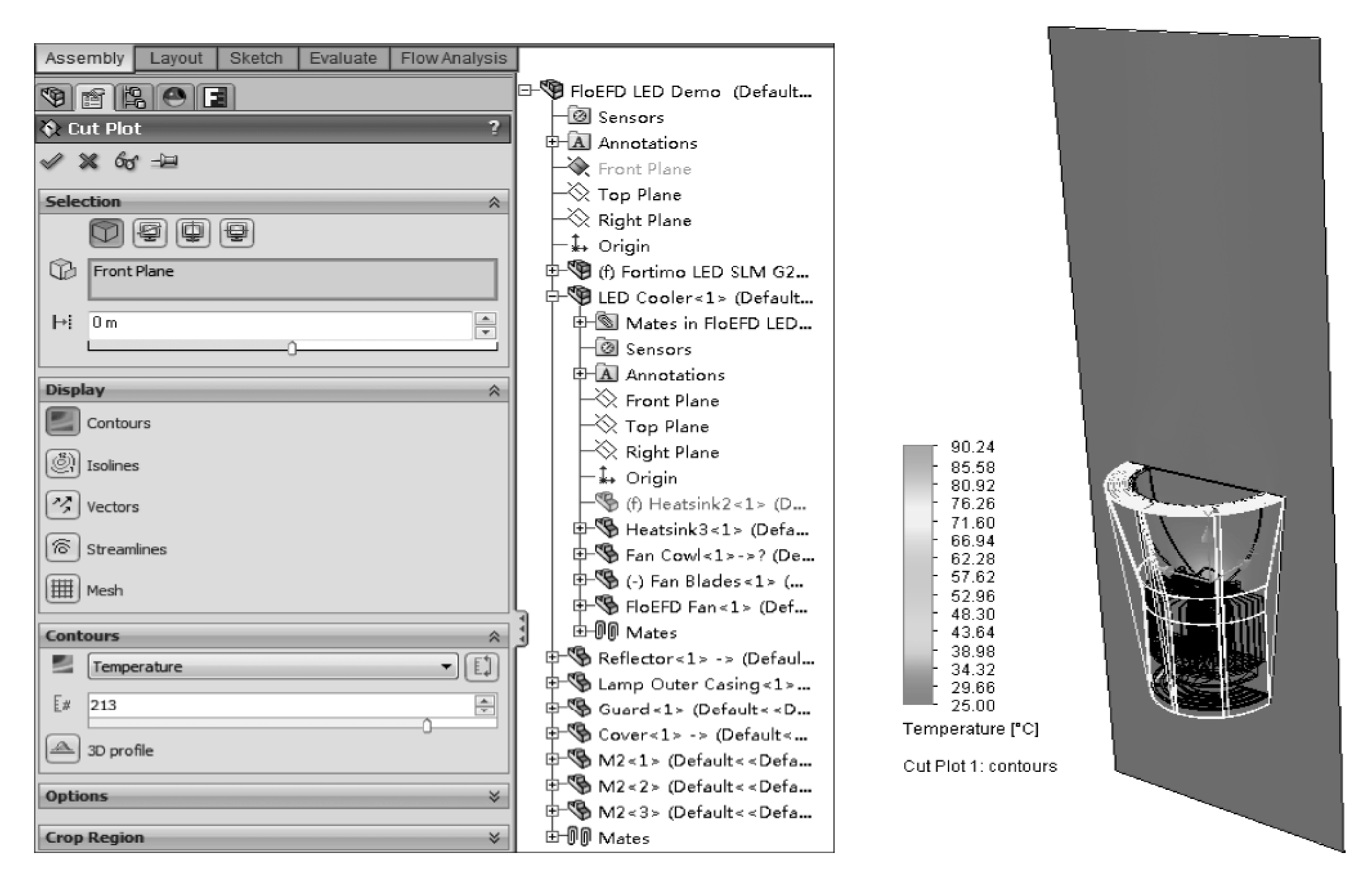


图 11-51　Cut Plot 对话框　　　　图 11-52　散热器表面温度云图

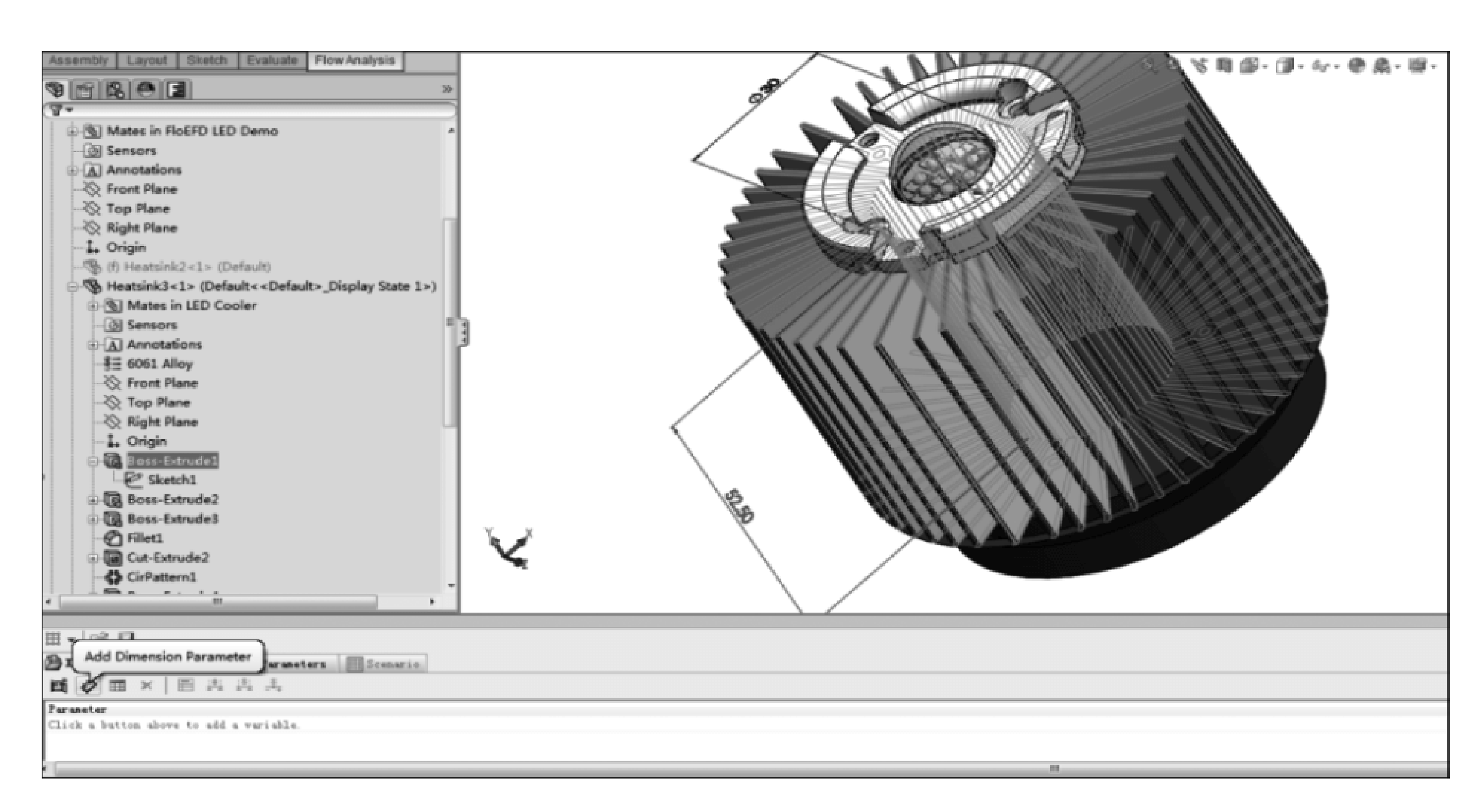


图 11-53　Parametric Study 设置对话框

在 Parametric Study 对话框中，单击 Edit Variation 图标，如图 11-54 所示，设置 Range with Number 中的参数值。并且单击 Range with Number 对话框右下角的√，退

出 Range with Number 对话框。

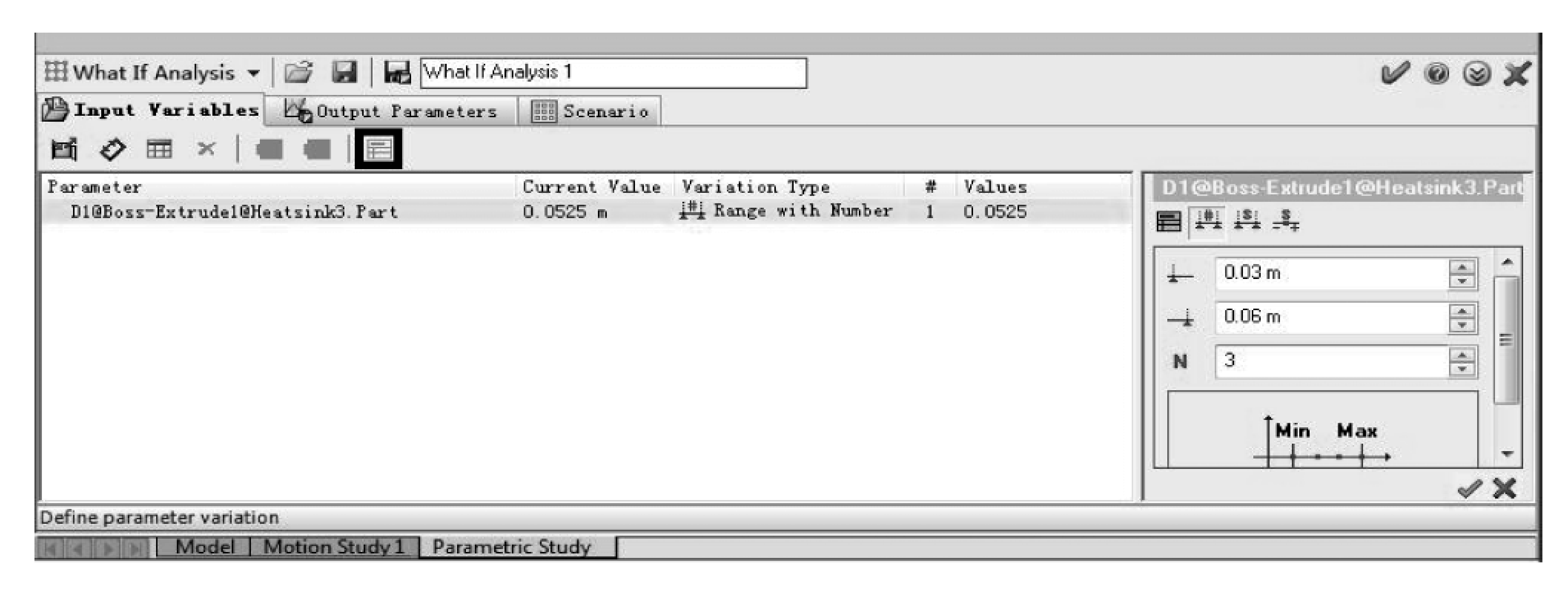


图 11-54　Parametric Study 设置对话框

如图 11-55 所示，首先双击模型树中 Heatsink3 < 1 >下的 Boss-Extrude4，使图形显示区域出现散热器翅片厚度尺寸和翅片间角度尺寸。并且单击 New Parametric Study 区域的 Add Dimension Parameter 图标。

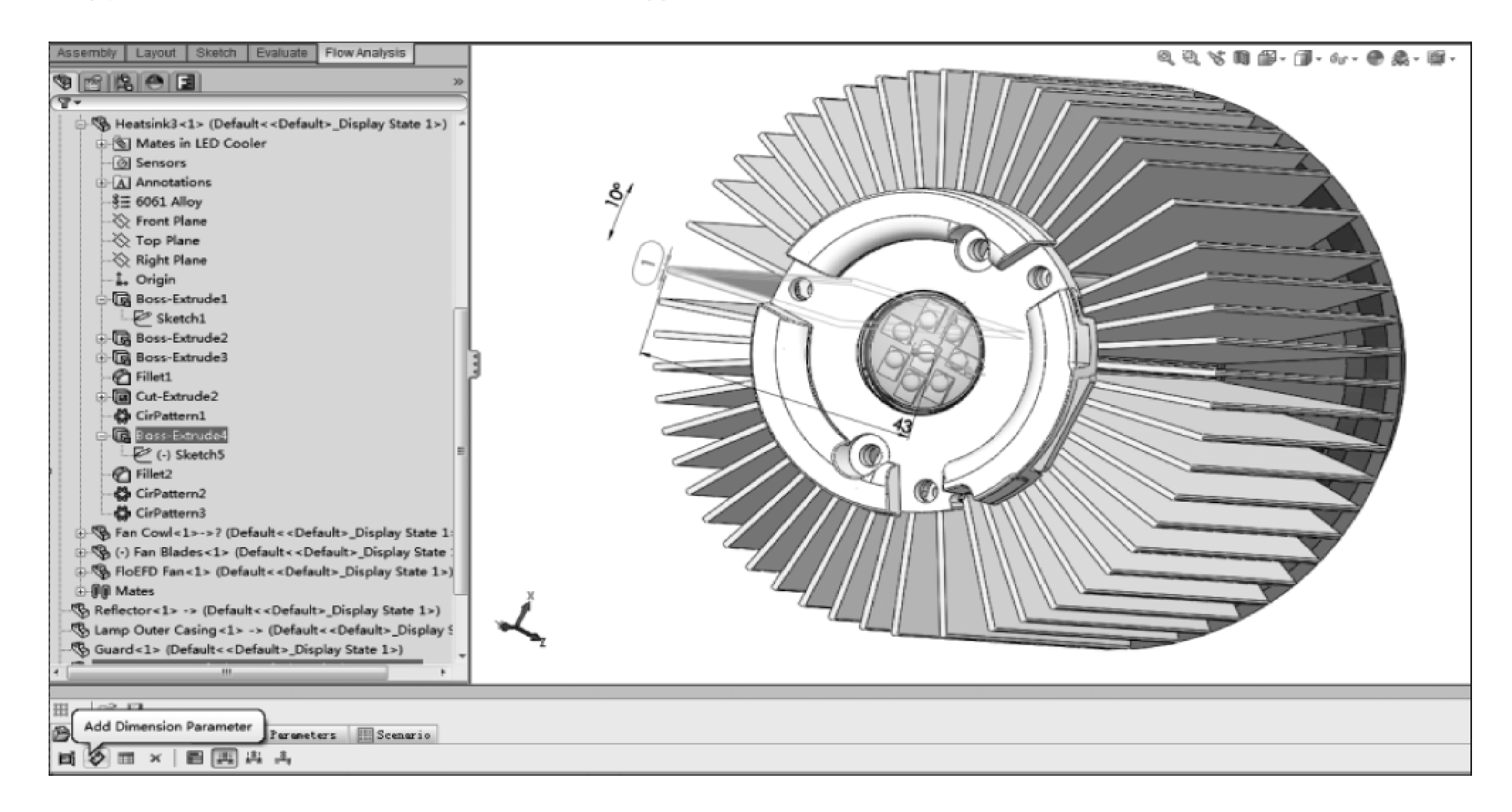


图 11-55　Parametric Study 设置对话框

弹出 Add Parameter 对话框之后，选择图形显示区域的 1，并且单击 Add Parameter 对话框右下角的√，退出 Add Parameter 对话框。

在 Parametric Study 对话框中，单击 Edit Variation 图标，如图 11-56 所示，设置 Range with Number 中的参数值(0.0003，0.001，3)。并且单击 Range with Number 对话框右下角的√，退出 Range with Number 对话框。

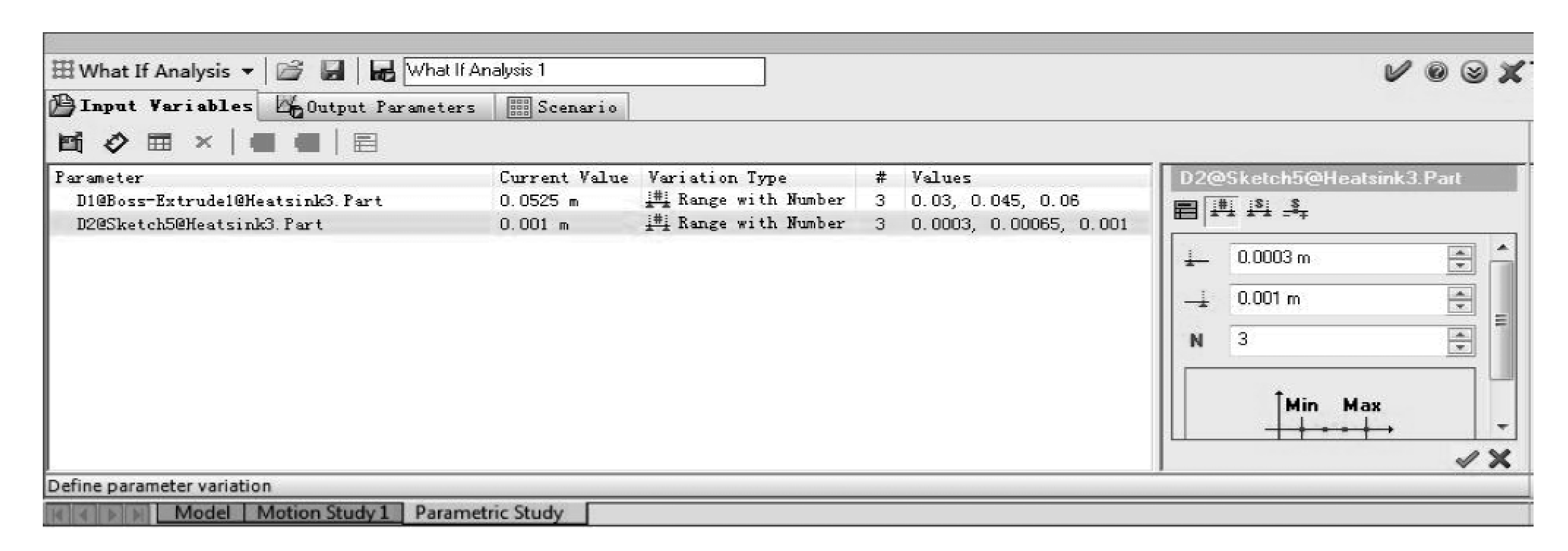


图 11-56　Parametric Study 对话框

图 11-57 所示为 Parametric Study 对话框中 Input Variables 中的设置结果。

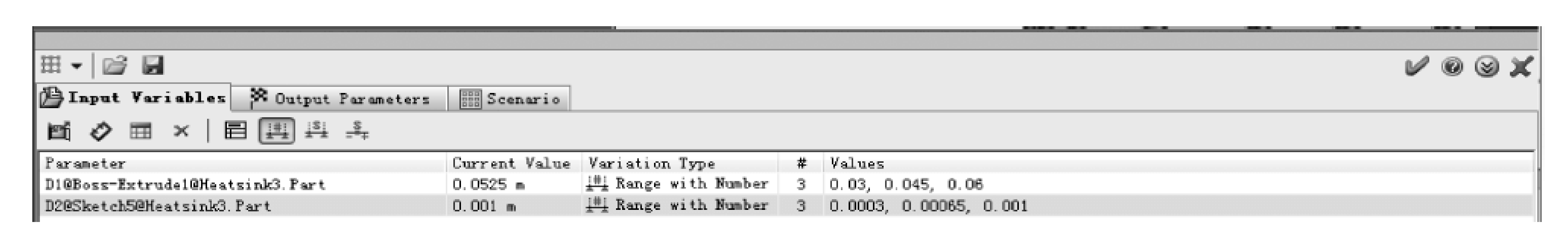


图 11-57　Parametric Study 对话框

单击 Parametric Study 对话框中的 Output Parameters，如图 11-58 所示，单击 Add Goal 图标。

如图 11-59 所示，在 Add Goal 对话框中，勾选 LED Jn Temp 1，并且单击 Add Goal 对话框右下角的√，退出 Add Goal 对话框。

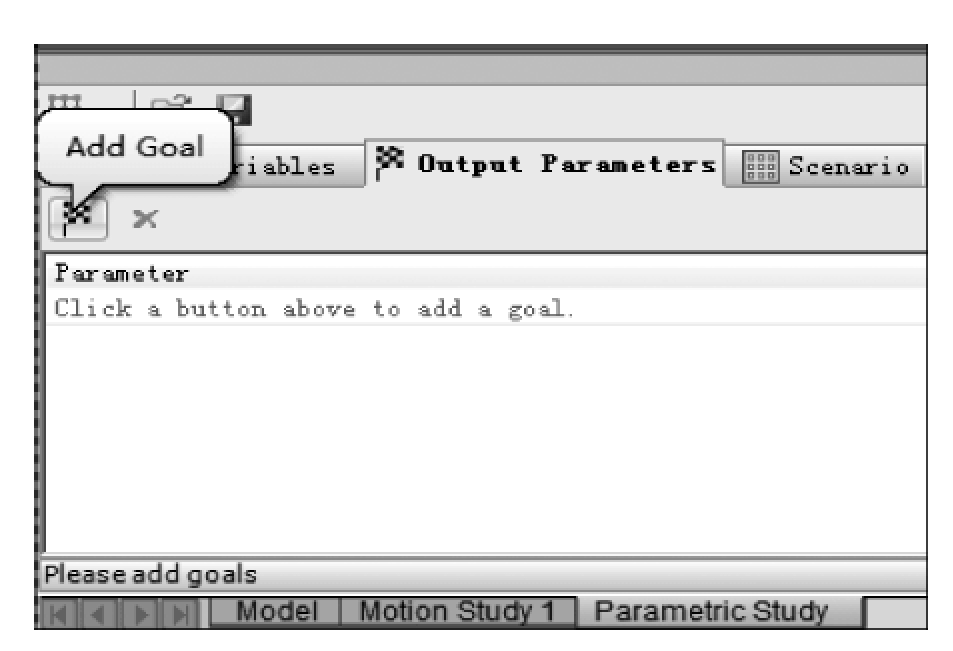


图 11-58　Parametric Study 对话框

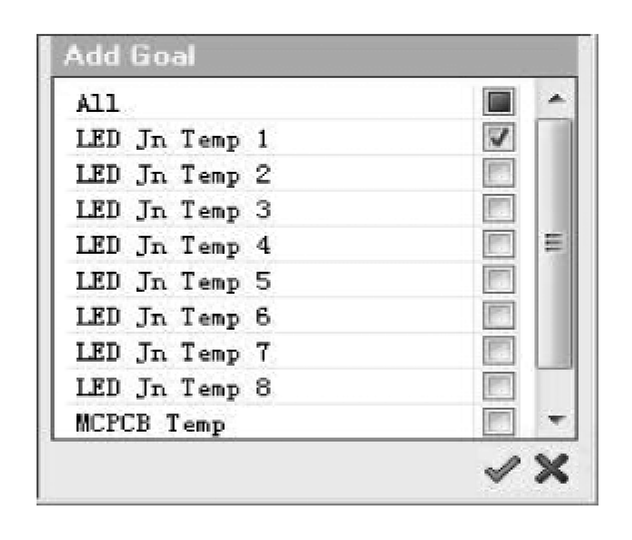


图 11-59　Parametric Study 对话框

单击 Parametric Study 对话框中的 Scenario，如图 11-60 所示，显示了软件自动创建的 9 个方案。单击 Run 图标，软件自动求解 9 个散热器设计方案。其中勾选每一个方案的 Take Previous Results。

图 11-61 所示为方案仿真结果，单击 Export To Excel 命令，保存文件 Parametric Study 到计算机中。图 11-62 所示为各方案 LED 温度结果对比。

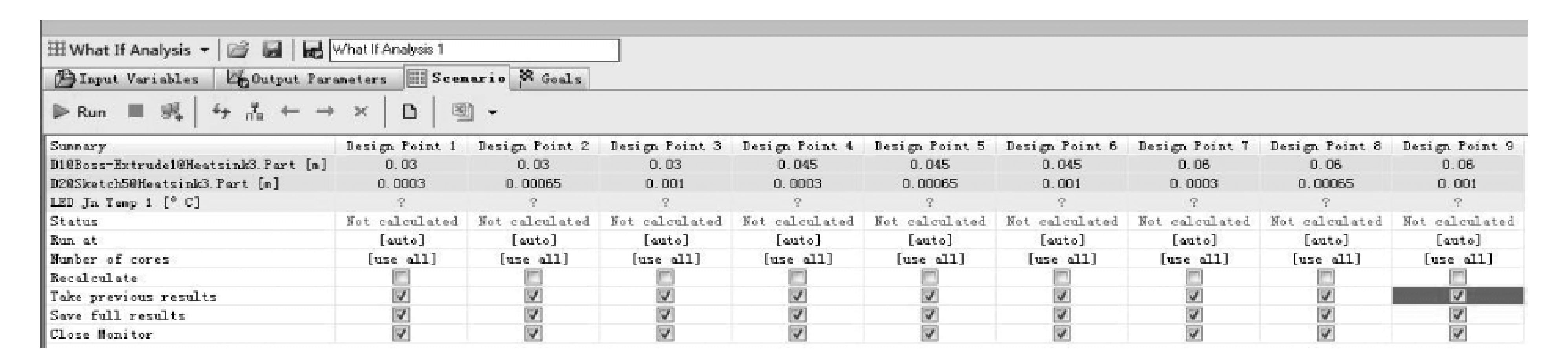


图 11-60　Parametric Study 对话框

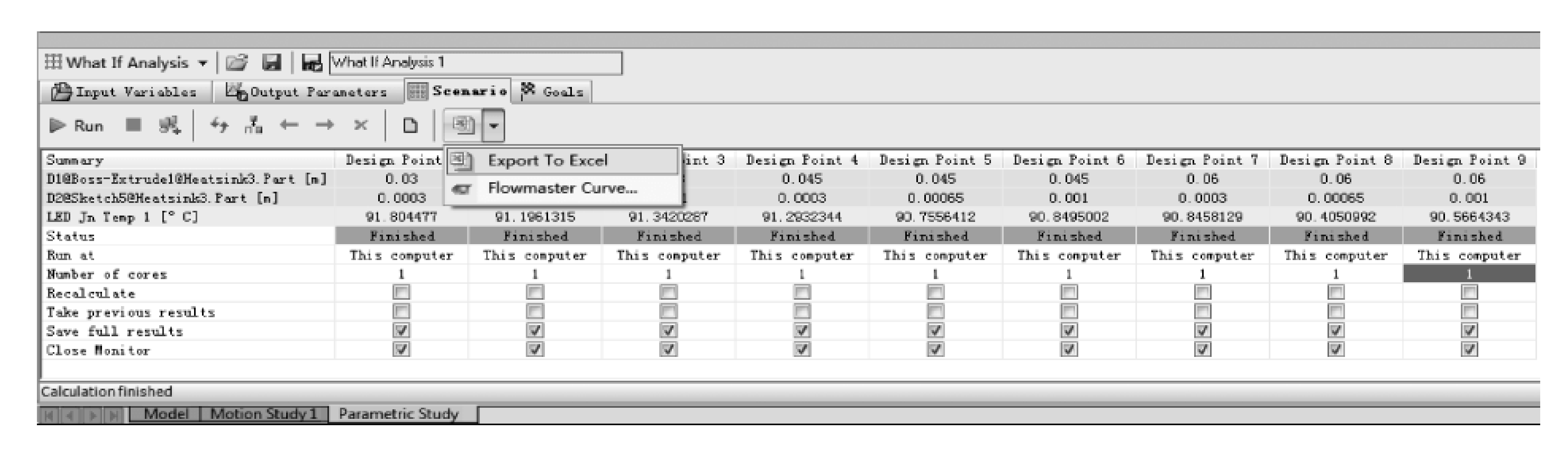


图 11-61　Parametric Study 对话框

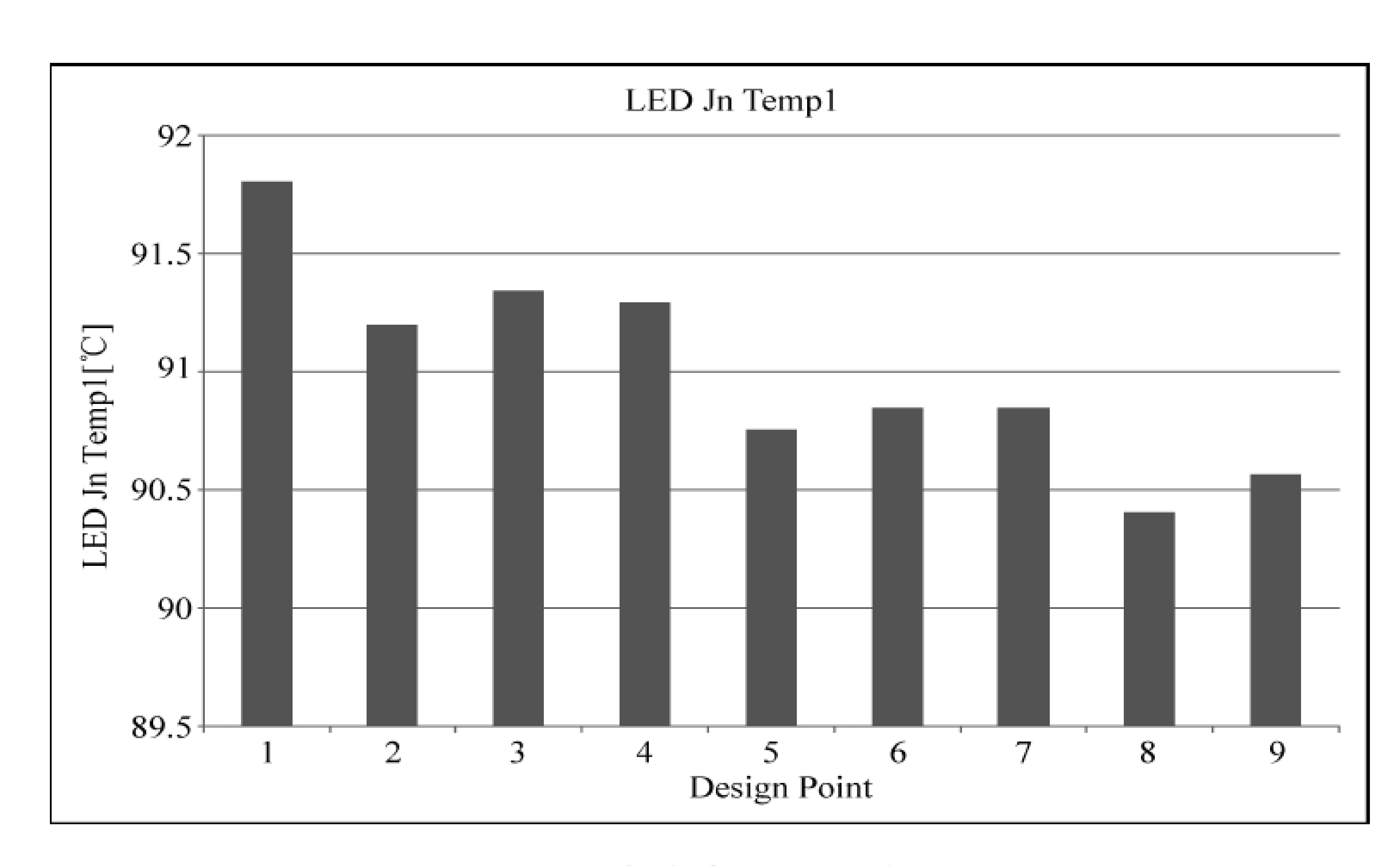


图 11-62　各方案 LED 温度结果

思考题

1. 如果本实例中 MCPCB 板与散热器之间采用热导率为 0.1W/(m·K)的导热界面材料，则 LED Jn Temp 1 的温度为多少？如果那层导热界面材料的属性为空气，则 LED Jn Temp 1 的温度为多少？（基于散热器未优化的结构进行分析）

2. 如果本例中不使用风扇，试讨论采用何种散热器（结构、尺寸、通风方向等），如何安装仍可基本达到本例的效果。

参 考 文 献

[1] 雷志锋，冯敬东. LED失效及其原因分析[C]. 大理：2007第十二届全国可靠性物理学术讨论会论文集，2007.

[2] 张万生，赵敏. LED失效机理研究[C]. 包头：第二届中国包头稀土产业论坛专家论文集，2010.

[3] 赵阿玲，尚守锦，陈建新. 大功率白光LED寿命试验及失效分析[J]. 照明工程学报，2010，21(1)：48-57.

[4] 郑代顺，钱可元，罗毅. 大功率发光二极管的寿命试验及其失效分析[J]. 半导体光电 2004，26(2)：87-92.

[5] 杨世铭. 传热学[M]. 4版. 北京：高等教育出版社，1980.

[6] 张兴中，黄文，刘庆国. 传热学[M]. 北京：高等教育出版社，2011.

[7] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 3版. 北京：高等教育出版社，1998.

[8] 张朝辉. Ansys8.0热分析教程与实例解析[M]. 北京：中国铁道出版社，2005.

[9] 李黎明. Ansys有限元分析实用教程[M]. 北京：清华大学出版社，2005.

[10] 冯士维，谢雪松，吕长治等. 半导体器件热特性的电学法测量与分析[J]. 半导体学，1999，20(5)：358-364.

[11] 李炳乾，布良基，范广涵. 芯片键合材料对功率型LED热阻的影响[J]. 半导体光电，2003，24(6)：422-424.

[12] 李炳乾，布良基，范广涵. 功率型LED热阻测量新方法[J]. 半导体光电，2003，24(1)：22.

[13] 祝效华，余志祥，程迎军等. ANSYS高级有限元分析——范例精选[M]. 北京：电子工业出版社，2004.

[14] 田民波. 电子封装工程[M]. 北京：清华大学出版社，2003.

[15] 周志敏，周纪海，纪爱华. LED驱动电路设计与应用[M]. 北京：人民邮电出版社，2006.

[16] 刘行仁，郭光华，林秀华. InGaN蓝光LED的发射光谱、色品质与正向电流的关系[J]. 照明工程学报，2004，15(1)：14-18.

[17] 罗毅，郭文平，邵嘉平等. GaN基蓝光发光二极管的波长稳定性研究[J]. 物理学报，2004. 8(53)：2720-2723.

[18] 蒋大鹏，侯凤勤，范希武等. 白色发光二极管色坐标和显色指数的一致性[J]. 液晶与显示，2002，17(3)：219-220.

[19] 李忠辉，丁晓民，杨志坚等. 高亮度InGaN基白光LED特性研究[J]. 红外与毫米波学报，2002，21(5)：390-392.

[20] 钱可元、胡飞、吴慧颖等. 大功率白光LED封装技术的研究[J]. 半导体光电，2005，26(2)：118-120.

[21] 李华平、柴广跃、彭文达、牛憨笨等. LED的封装及其散热基板[J]. 半导体光电，2007，28(1)：47-50.

[22] 李华平、柴广跃、彭文达、牛憨笨等. 微弧熔区的淬冷过程及其对氧化铝膜微观结构的影响[J]. 无机材料学报，2008，23(1).

[23] 李华平、柴广跃、彭文达、牛憨笨等. ALN薄膜覆AL基板的物理特性[J]. 电子元件与材料，2007，26(10)：54-56.

[24] 刘沛，柴广跃，郭伦春等. 基于不同散热模式LED的光电热特性研究[J]. 照明工程学报，2011，22(6)：45-50.

[25] 陈斌，王兴妍，黄辉等. Ⅲ-Ⅴ族半导体晶片键合热应力分析[J]. 半导体光电，2005，26(5)：421-425.

[26] 李炳乾. Super Flux Leds的热工控制[J]. 国际光电与显示，2002，6：155-160.

[27] 殷录桥. 大功率 LED 先进封装技术及可靠性研究[D]. 上海：上海大学，2011.
[28] 牛丽娟、李艳玲等. 热超声倒装焊在制作大功率 GaN 基 LED 中的应用 [J]. 光电子学，2007，44(9)：43-46.
[29] 向昊，曾黎明，胡传群. 各向异性导电胶的研究与应用现状[J]. 中国胶粘剂，2008，29(10)：42-44.
[30] 阳英、柴广跃、段子刚、高敏、张浩希. 基于 ANSYS 的大功率半导体光放大器的热分析[J]. 电子与封装：2008：8(9)：4-7.
[31] 栗红霞、庞保堂. 结温对 LED 的影响及温控技术的研究 [J]. 现代显示，2011，126：46-50.
[32] 李炳乾. LED 正向压降随温度的变化关系研究 [J]. 光子学报，2003. 32(11)：1349-135.
[33] 郭浩中，赖芳仪，郭守义. LED 原理与应用[M]. 北京：化学工艺出版社，2013.
[34] 江建平. 半导体激光器[M]. 2 版. 北京：电子工业出版社，2000.
[35] 刘恩科等. 半导体物理[M]. 4 版. 北京：国防工业出版社，2000.
[36] 柴广跃，邹念育，付贤松等. 半导体照明概论[M]. 北京：电子工业出版社. 2016.
[37] 张明德，孙小涵. 光纤通信原理与系统[M]. 4 版. 南京：东南大学出版社，2009.
[38] 丁天平，郭伟玲，崔碧峰，尹飞，崔德胜，闫薇薇. 温度对功率 LED 光谱特性的影响[J]. 光谱学与光谱分析，2011. 31(6)：1450-1453.
[39] 邱碧秀，微系统封装原理与技术[M]. 北京：电子工业出版社，2006.
[40] 李元庆、杨洋、付绍云. LED 封装用透明环氧树脂的改性[J]. 合成树脂及塑料，2007：24(3)：13.
[41] 隆志力，韩雷，吴运新，周宏权. 不同温度对热超声键合工艺连接强度的影响[J]. 焊接学报，2005，26(8)：23-38.
[42] 周志敏等. LED 热设计与工程应用[M]. 北京：电子工业出版社，2012.
[43] 李华平. 大功率 LED 的封装及其散热基板的研究[D]. 西安：中国科学院研究生院(西安光学精密机械研究所)，2007.
[44] 廖世东. 大功率 LED 灯具散热性能研究及驱动电路设计[D]. 深圳：深圳大学，2013.
[45] 苏丹. LED 在地铁照明系统中的应用及光学设计[D]. 深圳：深圳大学，2015.
[46] 李耀东. 全角度 LED 光源散热研究与设计[D]. 深圳：深圳大学，2014.

附录 A　软件术语中英文对照

Flow Analysis　流动分析
Global Goals　全局目标
Point Goals　点目标
Surface Goals　表面目标
Volume Goals　体积目标
Equation Goals　方程目标
Boundary Condition　边界条件
Initial Condition　初始条件
Porous Medium　多孔介质
Solid Material　固体材料
Surface Source　表面热源
Volume Source　体积热源
Radiative Surface　辐射表面
Radiation Source　辐射源
Fan　风扇
Film Condition　水膜条件
Tracer Study　示踪物研究
Local Initial Mesh　局部初始网格
Transferred Boundary Conditions　传递边界条件
Heat Sink Simulation　风扇散热器仿真
Rotating Region　旋转区域
Fluid Subdomain　流体子域
Contact Resistance　接触热阻
Thermoelectric Cooler　热电制冷器
Perforated Plate　打孔板
Two-Resistor Component　双热阻元件
Electrical Condition　电气条件
Heat Pipe　热管
Thermal Joint　热连接
Printed Circuit Board　印制电路板
LED　发光二极管
General Setting　通用设置
Computational Domain　计算域
Initial Mesh　初始网格
Component Control　元件控制
Calculation Control Options　计算控制选项
Run　求解
Batch Run　批处理求解
New Parametric Study　新建参数化研究
Engineering Database　工程数据库
Check Geometry　几何检查
Create Lid　创建封盖
Leak Tracking　泄露追踪
Heat Sources　热源
Cut Plots　切平云面
Surface Plots　表面云图
Isosurfaces　等值面云图
Flow Trajectories　流动迹线
Particle Studies　粒子研究
Point Parameters　点参数
Surface Parameters　表面参数
Volume Parameters　体积参数
Goal Plots　目标云图
Input Data　输入数据
Internal Flow　内部流动
External Flow　外部流动
Time-dependent　瞬态分析
Gravity　重力
Laminar　层流
Turbulent　湍流
Laminar and Turbulent　层流和湍流
Humidity　湿度
Initial Conditions　初始条件
Wall Conditions　壁面条件
Initial Mesh　初始网格
Basic Mesh　基础网格
Fluid Cells　流体网格
Partial Cells　部分网格
Solid Cells　实体网格

附录 B　T3Ster 系统介绍

B.1　T3Ster 系统概述

T3Ster 系统是 Mentor Graphics 公司研发的一种高性能的瞬态热测试系统，它是在布达佩斯科技与经济大学 20 世纪 90 年代开发的瞬态热测试设备的基础上成功研发的。该系统命名为 T3Ster，是 Thermal Transient Tester（瞬态热测试仪）的英文名称的缩写。

T3Ster 系统是一个智能化的瞬态热测试系统，它由硬件、软件以及测试方法组成，专业的测量半导体器件的热学属性，其测试主机 T3Ster Mainsys 如图 B-1 所示。

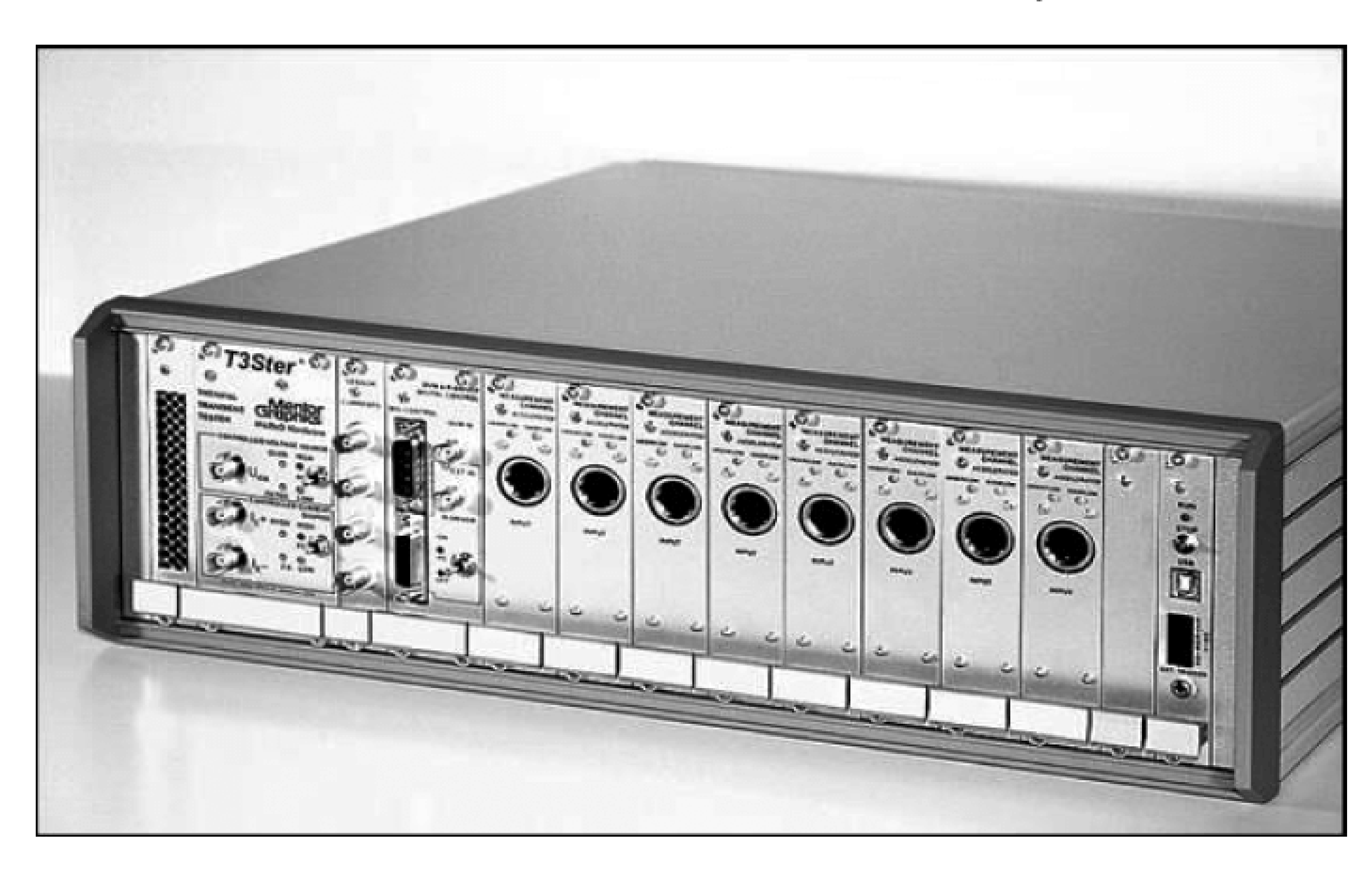


图 B-1　T3Ster 系统的测试主机 T3Ster Mainsys

T3Ster 系统拥有极高的性价比。由于 T3Ster 系统具有模块化的架构，该系统可通过模块的扩展来满足市场上各种半导体器件的实际热学测量要求，比如满足 LED 器件的热特性测量，此外，此系统还可以测试晶闸管、功率晶体管，大功率 IGBT 器件，MOSFET 和其他功率器件。凭借其分析软件 T3Ster-Master 拥有的独特的热瞬态评估和分析技术，T3Ster 系统成为业内的最佳选择。

T3Ster 系统是一种独特的设备，它能够对半导体器件的热特性进行测量。T3Ster 系统不仅适用于半导体器件的热特性的测量和分析，还可评估半导体器件的封装水平，可以对半导体器件封装的缺陷进行检测，以及在半导体器件进行可靠性测试后，对封装水平进行评估。

T3Ster 系统是一个计算机控制的设备，它与 PC 机一起使用，可以对瞬态热测试进

行控制，并通过 T3Ster-Master 软件对瞬态热测试的结果进行评估和分析，图 B-2 所示为正在进行测试的 T3Ster 系统。T3Ster 系统的操作软件能够对被测的半导体器件施加预先设置的加热功率，并记录半导体器件在这个加热功率下的复杂的热学反应。

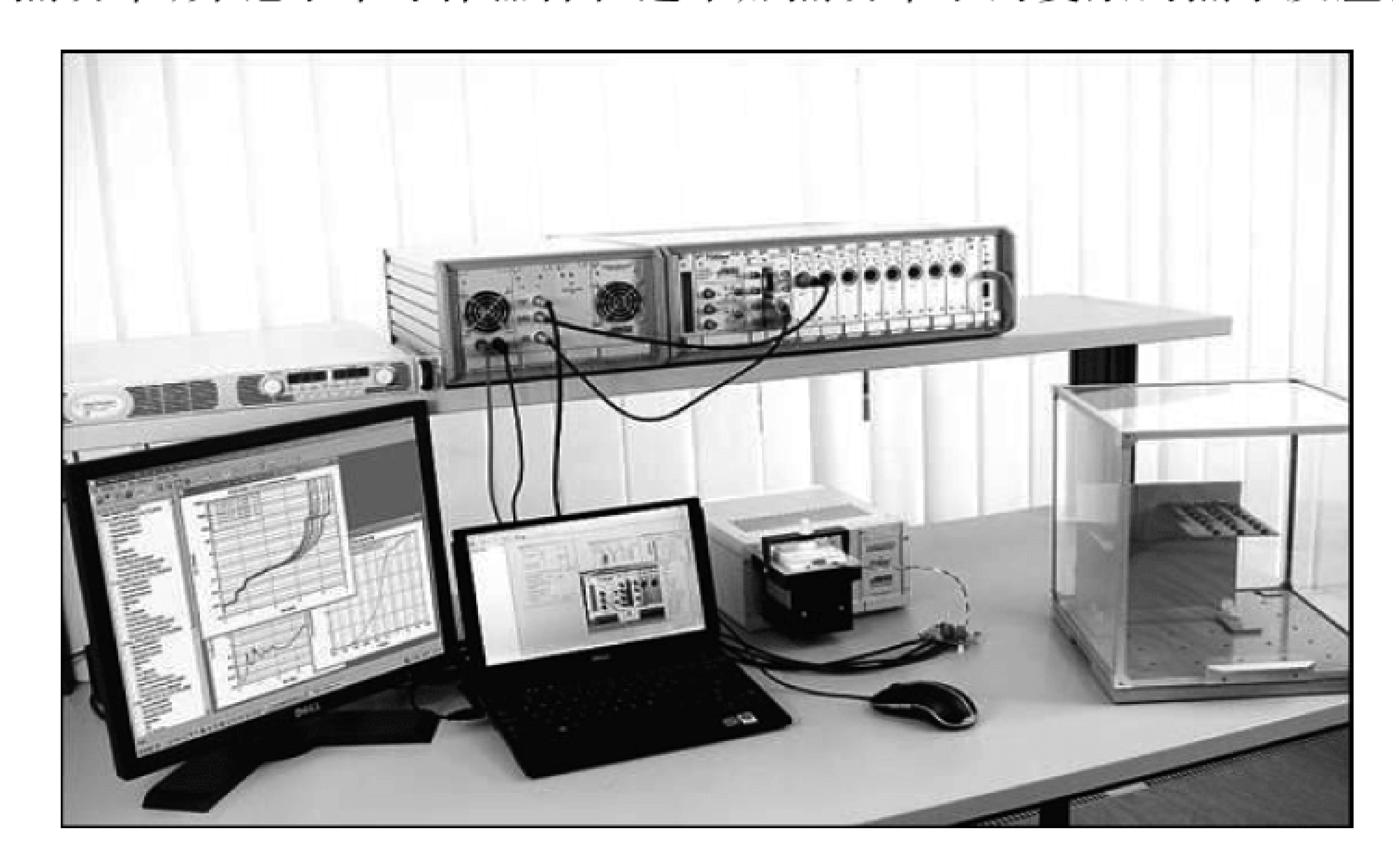


图 B-2　正在进行测试的 T3Ster 系统

T3Ster 系统采用的测量硬件与分析软件的设计有助于实现测试系统的宽领域应用，为各种待测半导体器件结构量身定制。通过 JEDEC 组织的静态测试方法(JESD51-1)的智能执行，T3Ster 系统仅需改变一次输入功率，即可在短时间内迫使封装的半导体芯片从"冷"的热学平衡状态到达"热"的热学平衡状态，同时根据测得的被测半导体器件内部瞬态温度响应曲线生成该封装的完整热特征报告。该系统能准确得出封装芯片在给定环境中的结温度-时间关系图。

与市场上其他热测试仪器相比，T3Ster 系统的优势在于其便捷的使用方式、广泛的应用领域、精准的结温测量(0.01℃)以及精确至 1μs 的时间测量分辨率，所有这些均与测量硬件和软件的灵活性分不开。

B.2　实时测量系统

T3Ster 系统可根据 JEDEC 组织的 JESD51-1 标准中描述的静态测试方法进行实时测量。该"连续测量"技术与精密硬件结果相结合，以高时间分辨率得到非常精确的、无噪声实时瞬态热测试曲线。

T3Ster 系统在业内创新实现了符合 JEDEC 组织 JESD51-1 标准定义的先进的静态测试方法。此方法强调使用一个稳定的加热功率，使一个封装的半导体器件从"相对冷却"的热平衡状态到"相对加热"的热平衡状态。达到热平衡状态后，再切换掉加热功率，并在半导体器件上通过微小的测试电流进行测量，此时 T3Ster 系统通过校准得到的被测半导体器件的温度敏感参数获得结电压-结温度一一对应的关系，从而得到半导体器件的瞬态温度响应曲线，在很短的时间内就可以完成一个完整的半导体器件热特性测量，直到和环境温度达到一个"相对冷却"的热平衡状态。通过软件分析可以得到半导体器

件在一个给定的环境中的非常精确的结温随时间的瞬态变化曲线，其原理图如图 B-3 所示。

此外，T3Ster 系统还可应用动态测试方法进行测量，即使用加热功率对被测半导体器件进行脉冲长度预先设置的脉冲加热，加热结束后切换成测试电流，对被测半导体器件的温度敏感参数进行单点测试，器件完全冷却后，再进行下一次预先设定脉冲长度的脉冲加热，其脉冲长度大于上一次的脉冲长度，加热结束后再切换成测试电流，进行单点测试，重复上述步骤进行多次单点测试，系统将会通过拟合得到被测半导体器件的温度上升曲线。动态测试方法适合于小功率半导体器件的应用以及测试精度要求不高的场合。

使用先进的静态测试方法测试半导体器件的结温冷却阶段的优势在于：

（1）测试周期短，典型的大功率 LED 器件热特性测试时间在 30 分钟内完成；

（2）在测量中，不受加热过程中加热功率变化的影响，半导体器件被施加的阶跃功率保持稳定，符合 JEDEC 组织 JESD51-14 标准中对于瞬态热测试的要求；

（3）静态测试方法可以测量半导体器件由于加热状态到测试状态所施加功率的阶跃变化所引起的最初时间段内的初始电气噪音的变化，并按照 JEDEC 组织 JESD51-14 标准中规定的方法处理，可以消除初始电气噪音的影响，提高测量的精度且应用方便；

（4）适合于大功率 LED 器件的测试；

（5）完整的、高精度的热响应曲线可以产生足够精度的结构函数进行分析；

（6）JEDEC 组织 JESD51-14 标准明确规定了使用静态测试方法进行瞬态热测试。

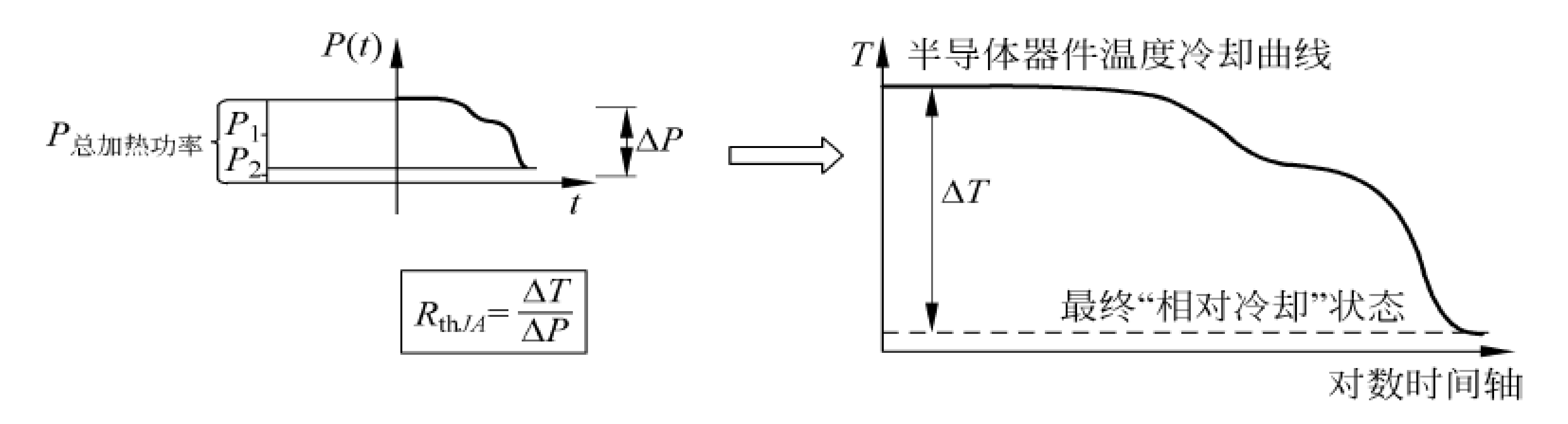


图 B-3 JESD51-1 静态测试方法的原理图

B.3 T3Ster 系统的测试主机 T3Ster Mainsys 介绍

T3Ster 系统的测试主机 T3Ster Mainsys 主要包括：驱动电源单元、数据测量采集单元和数字控制单元，如图 B-4 所示。测试主机 T3Ster Mainsys 是通过高速的 USB 与控制计算机进行连接的。

T3Ster Mainsys 的数字控制单元负责控制驱动电源单元和数据测量采集单元，并通过高速的 USB 与控制计算机连接，负责控制计算机和主机 T3Ster Mainsys 之间的数据流管理与通信，其测试平台总体示意图如图 B-5 所示。

在控制计算机上运行测量控制与评估分析软件。就测量控制的角度来看，对该控制计算机无特殊要求。后续对测得原始数据的评估分析则要求控制计算机采用 Windows XP/7 操作系统并且运行速度达到 160～200MHz。

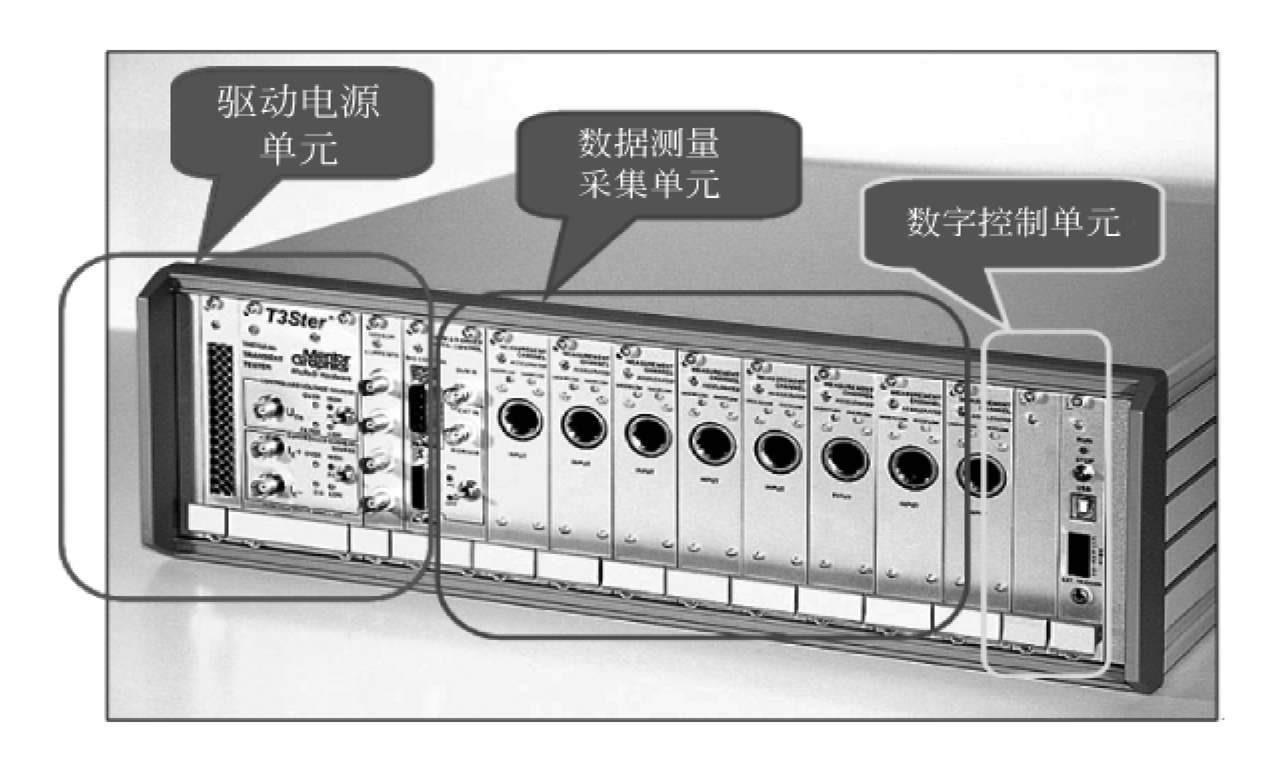


图 B-4　T3Ster 系统的测试主机

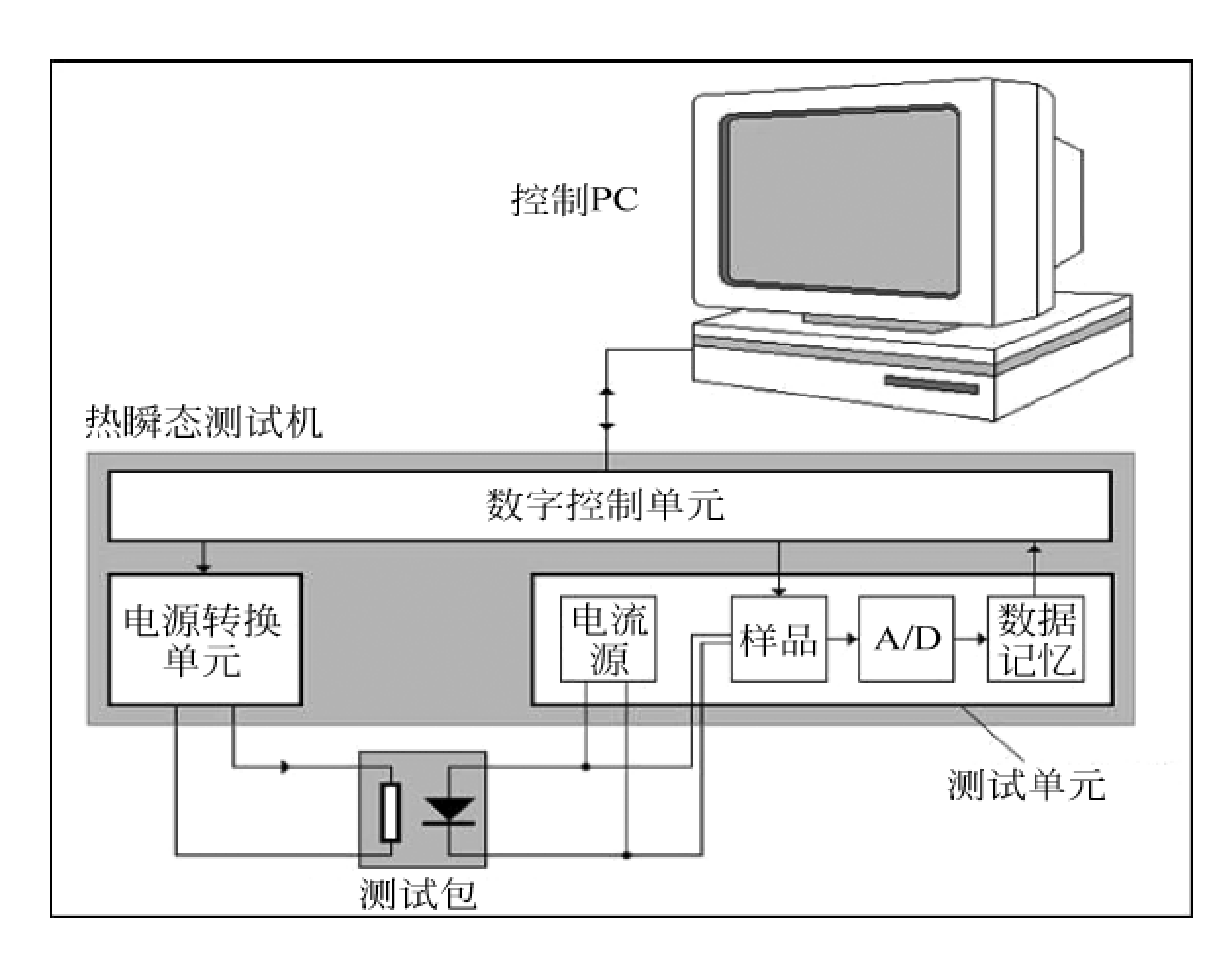


图 B-5　T3Ster 系统测试平台总体示意图

测试主机 T3Ster Mainsys 的可编程电压源可在两个预先设置的电压之间进行切换，电子开关的切换的时间是 1μs。受控的可编程电流源从一个预设的、编程的电流值切换到零值，切换的时间是 1μs，如果是电流打开的切换时间则会稍长。

受控可编程电压源 U_{BC} 的参数如下：

(1) 电压范围：−10.24V～+10.24V；

(2) 精度：0.5%；

(3) 分辨率：12bit。

受控可编程电流源 I_E 的参数如下：

(1) 电流范围：−2A～+2A；

(2) 精度：0.5%；

(3) 分辨率：12bit。

受控可编程测试电流源 I_M 的参数如下：

(1) 电流范围：－25.5mA～＋25.5mA；

(2) 精度：0.5％；

(3) 分辨率：12bit。

共计4个相同的受控可编程测试电流源可供测试时使用。

当被测半导体器件(DUT)为二极管类器件时，受控可编程电流源 I_E 提供被测器件的耗散功率。受控可编程电流源 I_E 和受控可编程测试电流源 I_M 这两种电流源在加热阶段为二极管进行加热。关闭受控可编程电流源 I_E 后，在二极管内只保留测试电流 I_M，设备记录冷却曲线并进行瞬态热测试。此时被测半导体器件的最大耗散功率约为1V×2A＝2W。

驱动电源单元提供的面板开关具有3个状态：OFF/PC/ON。当面板开关在PC状态时，该电子开关仅由控制电脑控制。通过这种方式，根据所要求的测量设置，预先编程的ON或OFF状态可以为这些电源稳定的设置。

在驱动电源单元中内置一个数字式万用表，它包括一个差分式输入衰减器和一个A/D转换器。数字式万用表的性能指标如下：

(1) 电压测量范围：±0～±5V，12bit；

(2) ±5～±51.2V，12bit；

(3) 最大输入电压：±100V；

(4) 输入阻抗：1MΩ，差分式输入。

T3Ster系统为8个相同的测量通道配有8个插槽，可根据需要配置1～8个测量通道。每个数据测量采集单元(测量通道)都有自己的A/D转换器电路和数据存储空间。在瞬态热测试中，数据采集的时间分辨率为1μs，采集电压的分辨率是12bit，而且噪声振幅小于2bit。这意味着，信号噪声比低至约70dB，这种高精确度的数据测量、采集，对以后的瞬态热测试响应曲线的评价和分析是至关重要的。

每个数据测量采集单元(测量通道)具有一个内部可编程补偿电路。二极管的温度敏感参数的测量需要使用该电路，因为二极管约为0.7V的正向电压需要得到补偿，以便专门测量二极管正向电压的变化量。T3Ster系统的操作软件自动进行该补偿。如果采用“MOS DIODE”的测量方式，并用作温度敏感参数，补偿电压范围被扩展至±5V。

每个数据测量采集单元(测量通道)的输入阻抗约为100 kΩ，最大的采样速率为1MHz，拥有64K的存储空间。

测量和采集的电压的输入范围在50mV或者100mV或者200mV或者400mV的范围可选。电压的最高分辨率是12μV，通常LED器件的温度敏感系数是2mV/℃，在最敏感的范围内，对应于温度的测量精度12μV/(2mV/℃)＝0.006℃，可以确保0.01℃的温度分辨率。对于使用热电偶测量环境温度而言，可选配如下配件：热电偶前置放大器，由带有测量头的特殊线缆连接。使用该选配配件，热电偶测量的温度分辨率可延伸至0.02℃。

T3Ster系统的测试主机T3Ster Mainsys的数字控制(测量判断)单元控制测量过程。该单元包含一个由电脑加载的程序内存。该程序内存的内容既决定了样本采样率又决定了驱动电源单元打开、关闭的状态切换。

B.4 T3Ster 系统的 T3Ster Booster 介绍

如果被测半导体器件为 LED 器件，T3Ster 系统的测试主机 T3Ster Mainsys 只能提供大约 1V×2A=2W 的加热功率，对于大功率 COB 封装的 LED 器件来讲是远远不够的。对此，T3Ster 系统提供了不同种类的 T3Ster Booster 来扩展 T3Ster 系统的应用范围。

T3Ster——HV 版本 T3Ster Booster 的介绍：HV 版本的 T3Ster Booster 包含以下三种型号的 T3Ster Booster，分别是 10A/100V T3Ster Booster、10A/150V T3Ster Booster 以及 10A/280V T3Ster Booster，其中 10A/280V T3Ster Booster 是通过 Booster Extension Box 在 10A/150V T3Ster Booster 基础上扩展而来的。

10A/100V T3Ster Booster 和 10A/150V T3Ster Booster 的外形和连接端口如图 B-6 和图 B-7 所示。



图 B-6　10A/100V T3Ster Booster 和 10A/150V T3Ster Booster 前面板以及端口说明



图 B-7　10A/100V T3Ster Booster 和 10A/150V T3Ster Booster 背面板以及端口说明

10A/100V T3Ster Booster 可以在器件正向导通电压为 0～100V 的条件下，加热电流在 0～10A 的范围内线性输出。

10A/100V T3Ster Booster 内部有两个独立的受控可编程电流源，允许的最大电流分别是 20mA 和 200mA。每个内置的电流源可以充当一个受控可编程测试电流源或一个受控可编程加热电流源，具体取决于在 T3Ster 系统控制软件的 On/Off 开关的状态。选择较低的范围内的受控可编程电流源进行电流的输出，可以获得更准确的输出电流。配合外置的 Keysight 电源 N5770A，最大的输出电流可以达到 10A。

10A/100V T3Ster Booster 内部两个独立的受控可编程电流源的参数如下：

（1）小范围的受控可编程电流源的参数为：电流范围：0～20mA，线性输出；器件正向导通电压：0～100V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

（2）大范围的受控可编程电流源的参数为：电流范围：0～200mA，线性输出；器件正向导通电压：0～100V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

在 10A/100V T3Ster Booster 内部内置一个约为 20∶1 的分压器，它可以将被测 LED 器件的正向导通电压通过计算转换为 T3Ster 系统测试主机 T3Ster Mainsys 测量通道的电压采样范围(电压采样范围最高为 5V)。

10A/150V T3Ster Booster 可以在器件电压正向导通电压为 0～150V 的条件下，加热电流在 0～10A 的范围内，线性输出。

10A/150V T3Ster Booster 内部有两个独立的受控可编程电流源，允许的最大电流分别是 20mA 和 200mA。每个内置的电流源可以充当一个受控可编程测试电流源或一个受控可编程加热电流源，具体取决于在 T3Ster 系统控制软件的 On/Off 开关的状态。选择较低的范围内的受控可编程电流源进行电流的输出，可以获得更准确的输出电流。配合外置的 Keysight 电源 N5770A，最大的输出电流可以达到 10A。

10A/150V T3Ster Booster 内部两个独立的受控可编程电流源的参数如下：

（1）小范围的受控可编程电流源的参数如下：电流范围：0～20mA，线性输出；器件正向导通电压：0～150V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

（2）大范围的受控可编程电流源的参数如下：电流范围：0～200mA，线性输出；器件正向导通电压：0～150V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

在 10A/150V T3Ster Booster 内部内置一个约为 30∶1 的分压器，它可以将被测 LED 器件的正向导通电压通过计算转换为 T3Ster 系统测试主机 T3Ster Mainsys 测量通道的电压采样范围(电压采样范围最高为 5V)。

10A/280V T3Ster Booster 可以在器件电压正向导通电压为 0～280V 的条件下，加热电流在 0～10A 的范围内，线性输出。10A/280V T3Ster Booster 是在 10A/150V T3Ster Booster 的基础上通过 Booster Extension Box 进行扩展而得到的。

Booster Extension Box 的外形和连接端口如图 B-8 和图 B-9 所示。

10A/280V T3Ster Booster 的连线示意图如图 B-10 和图 B-11 所示。

10A/280V T3Ster Booster 内部有两个独立的受控可编程电流源，允许的最大电流分别是 20mA 和 200mA。每个内置的电流源可以充当一个受控可编程测试电流源或一

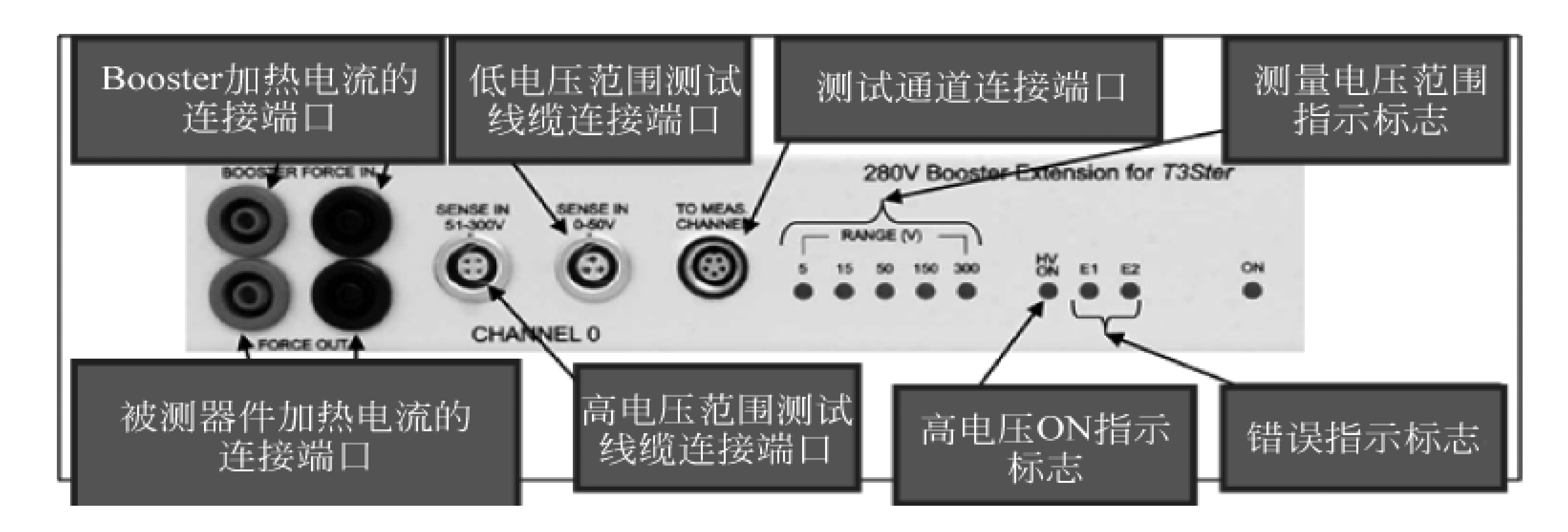


图 B-8 Booster Extension Box 前面板以及端口说明

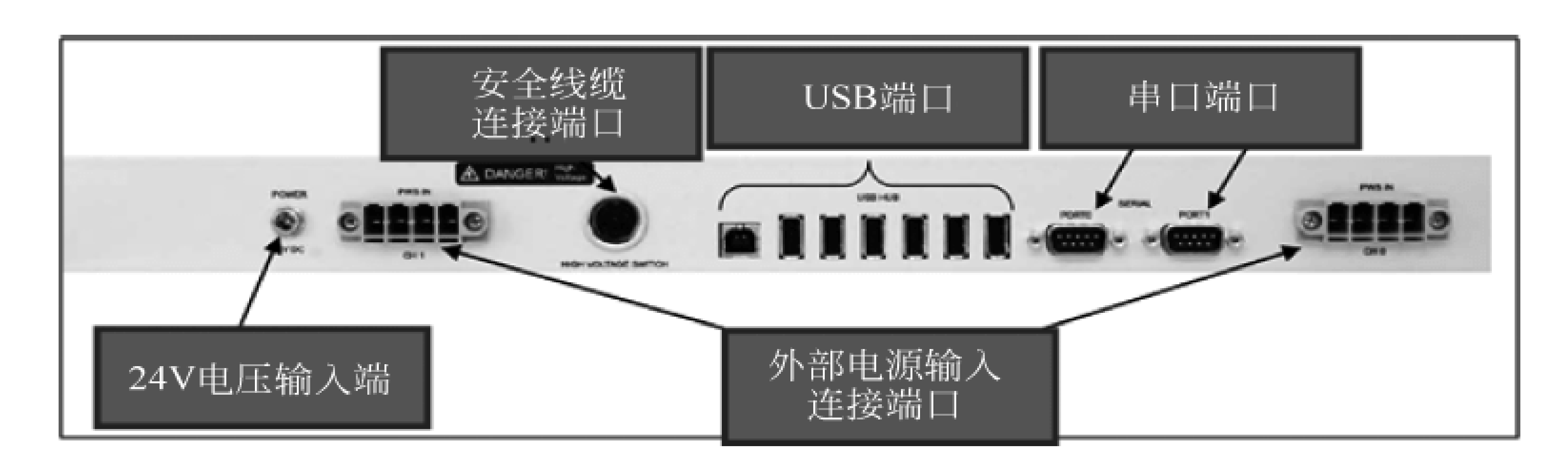


图 B-9 Booster Extension Box 后面板以及端口说明

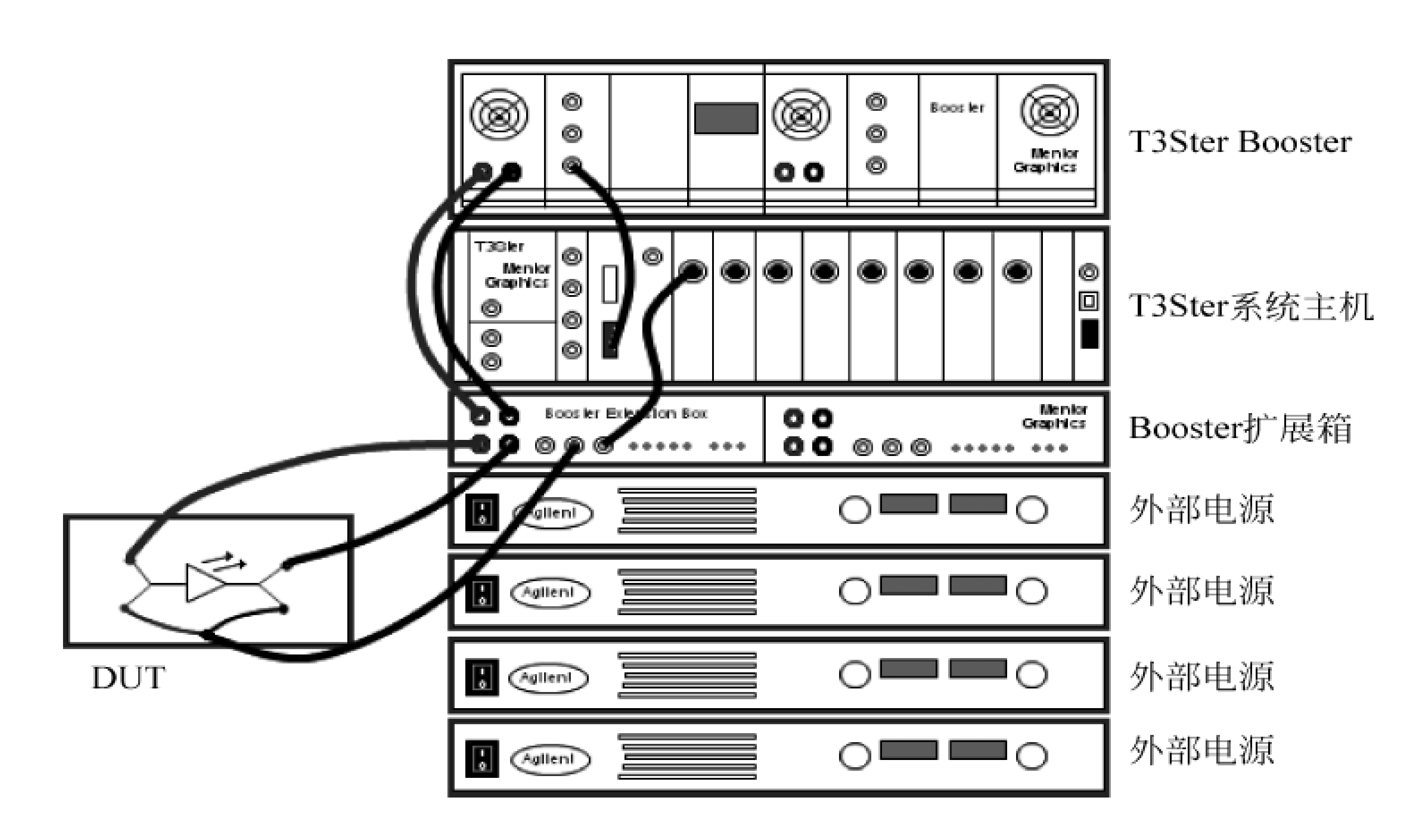


图 B-10 10A/280V T3Ster Booster 前面板连线示意图

个受控可编程加热电流源，具体取决于在 T3Ster 系统控制软件的 On/Off 开关的状态。选择较低的范围内的受控可编程电流源进行电流的输出，可以获得更准确的输出电流。配合外置的 Keysight 电源 N5770A，最大的输出电流可以达到 10A。

10A/280V T3Ster Booster 内部两个独立的受控可编程电流源的参数如下：

（1）小范围的受控可编程电流源的参数如下：电流范围：0～20mA，线性输出；器件正向导通电压：0～280V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

（2）大范围的受控可编程电流源的参数如下：电流范围：0～200mA，线性输出；器

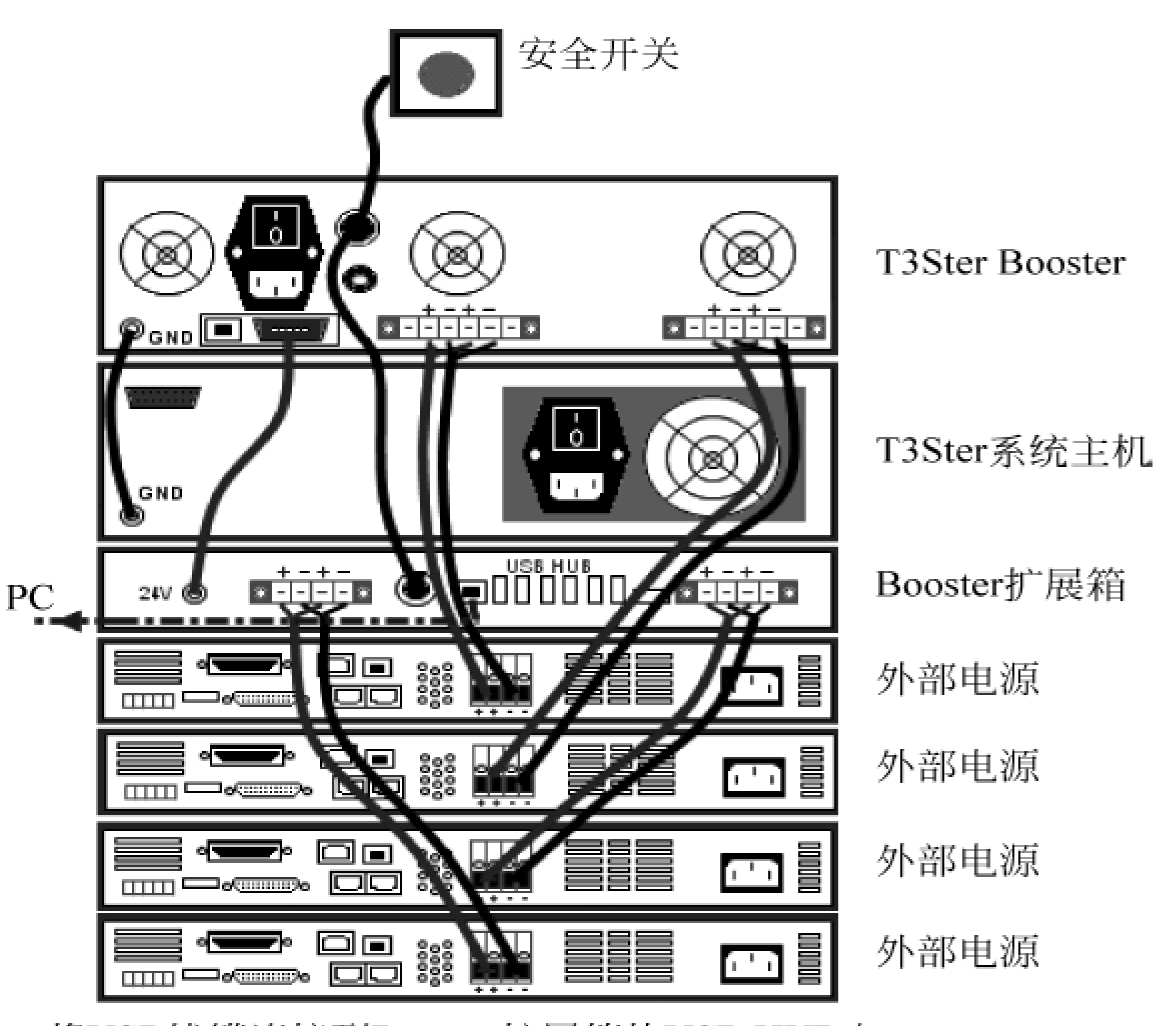


图 B-11　10A/280V T3Ster Booster 背面板连线示意图

件正向导通电压：0～280V；电流分辨率：12bit；精度：0.5%。

在 10A/280V T3Ster Booster 内部有多个内置的分压器，它能够将合适的测量电压变为测试主机 T3Ster Mainsys 测量通道所要求的测试电压（最多到 5V）。在 10A/280V T3Ster Booster 内部内置有 5 个不同的分压器，分别对应 5V、15V、60V、150V 和 300V 的测试电压。

每一种 HV 版本的 T3Ster Booster 提供了两种电压模式：一种为低电压模式；另一种为高电压模式。高低压模式下，电压的极限值如表 B-1 所示。

表 B-1　高低压模式下，电压的极限值

T3Ster Booster 型号	低压模式上限值	高压模式上限值
HV 100V/10A	38V	100V
HV 150V/10A	38V	150V
HV 280V/10A	—	280V

高低压模式下，电流的极限值如表 B-2 所示。

表 B-2　高低压模式下，电流的极限值

T3Ster Booster 型号	低压模式下电流上限值			高压模式下电流上限值		
电流范围	20mA	200mA	连接外部电源	20mA	200mA	连接外部电源
HV 100V/10A	20mA	200mA	10A	20mA	180mA	10A
HV 150V/10A	20mA	200mA	10A	20mA	200mA	10A
HV 280V/10A	20mA	200mA	10A	20mA	200mA	10A

B.5　LV 版本 T3Ster Booster 介绍

LV 版本的 T3Ster Booster 包含以下两种型号的 T3Ster Booster，分别是 50A/30V T3Ster Booster 以及 38A/40V T3Ster Booster。

50A/30V T3Ster Booster 和 38A/40V T3Ster Booster 的外形和连接端口如图 B-12 和图 B-13 所示。



图 B-12　50A/30V T3Ster Booster 和 38A/40V T3Ster Booster 前面板以及端口说明



图 B-13　50A/30V T3Ster Booster 和 38A/40V T3Ster Booster 背面板以及端口说明

50A/30V T3Ster Booster 可以在器件正向导通电压为 0～30V 的条件下，加热电流为 0～50A，线性输出。

50A/30V T3Ster Booster 内部有三个独立的受控可编程电流源，允许的最大电流分别是 20mA、200mA 和 2A。每个内置的电流源可以充当一个受控可编程测试电流源或一个受控可编程加热电流源，具体取决于在 T3Ster 系统控制软件的 On/Off 开关的状态。选择较低的范围内的受控可编程电流源进行电流的输出，可以获得更准确的输出电

流。配合外置的 Keysight 电源 N5765A,最大的输出电流可以达到 50A。在测试过程中,测试电流将自动选择一个小范围的受控可编程电流源,以获得较高精度的电流,并将大范围的受控可编程电流源选择为加热电流源。

50A/30V T3Ster Booster 内部三个独立的受控可编程电流源的参数如下:

(1) 小范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~20mA,线性输出;器件正向导通电压:0~30V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

(2) 中间范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~200mA,线性输出;器件正向导通电压:0~30V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

(3) 大范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~2A,线性输出;器件正向导通电压:0~30V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

在 50A/30V T3Ster Booster 内部内置一个约为 10:1 的分压器,它可以将被测 LED 器件的正向导通电压通过计算转换为 T3Ster 系统测试主机 T3Ster Mainsys 测量通道的电压采样范围(电压采样范围最高为 5V)。

38A/40V T3Ster Booster 可以在器件电压正向导通电压为 0~40V 的条件下,加热电流在 0~38A 的范围内,线性输出。

38A/40V T3Ster Booster 内部有三个独立的受控可编程电流源,允许的最大电流分别是 20mA、200mA 和 2A。每个内置的电流源可以充当一个受控可编程测试电流源或一个受控可编程加热电流源,具体取决于在 T3Ster 系统控制软件的 On/Off 开关的状态。选择较低的范围内的受控可编程电流源进行电流的输出,可以获得更准确的输出电流。配合外置的 Keysight 电源 N5765A,最大的输出电流可以达到 38A。在测试过程中,测试电流将自动选择一个小范围的受控可编程电流源,以获得较高精度的电流,并将大范围的受控可编程电流源选择为加热电流源。

38A/40V T3Ster Booster 内部三个独立的受控可编程电流源的参数如下:

(1) 小范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~20mA,线性输出;器件正向导通电压:0~40V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

(2) 中间范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~200mA,线性输出;器件正向导通电压:0~40V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

(3) 大范围的受控可编程电流源的参数为:电流范围:0~2A,线性输出;器件正向导通电压:0~40V;电流分辨率:12bit;精度:0.5%。

在 50A/30V T3Ster Booster 内部内置一个约为 10:1 的分压器,它可以将被测 LED 器件的正向导通电压通过计算转换为 T3Ster 系统测试主机 T3Ster Mainsys 测量通道的电压采样范围(电压采样范围最高为 5V)。

每一种 LV 版本的 T3Ster Booster 提供了两种电压模式:一种为低电压模式;一种为高电压模式。高低压模式下,电压的极限值如表 B-3 所示。

表 B-3 高低压模式下,电压的极限值

T3Ster Booster 型号	低压模式上限值	高压模式上限值
LV 30V/50A	6V	30V
LV 40V/38A	15V	40V

高低压模式下，电流的极限值如表 B-4 所示。

表 B-4　高低压模式下，电流的极限值

T3Ster Booster 型号			低压模式下电流上限值			高压模式下电流上限值		
电流范围	20mA	200mA	2A	连接外部电源	20mA	200mA	2A	连接外部电源
LV 30V/50A	20mA	200mA	2A	50A	20mA	180mA	1.6A	50A
LV 40V/38A	20mA	200mA	1.6A	38A	20mA	200mA	1A	38A

B.6　T3Ster 系统 Thermostat 干式恒温槽介绍

T3Ster 系统提供一个可以被控制电脑控制的 Thermostat 干式恒温槽，它是通过珀尔帖效应进行散热的，也就是一个半导体散热器，如图 B-14 所示。



图 B-14　Thermostat 干式恒温槽

通过 RS232 线缆经由串口将 Thermostat 干式恒温槽和 T3Ster 系统的控制电脑进行连接，T3Ster 系统的控制软件可以同时对 Thermostat 干式恒温槽和测试主机 T3Ster Mainsys 进行控制，如图 B-15 所示。

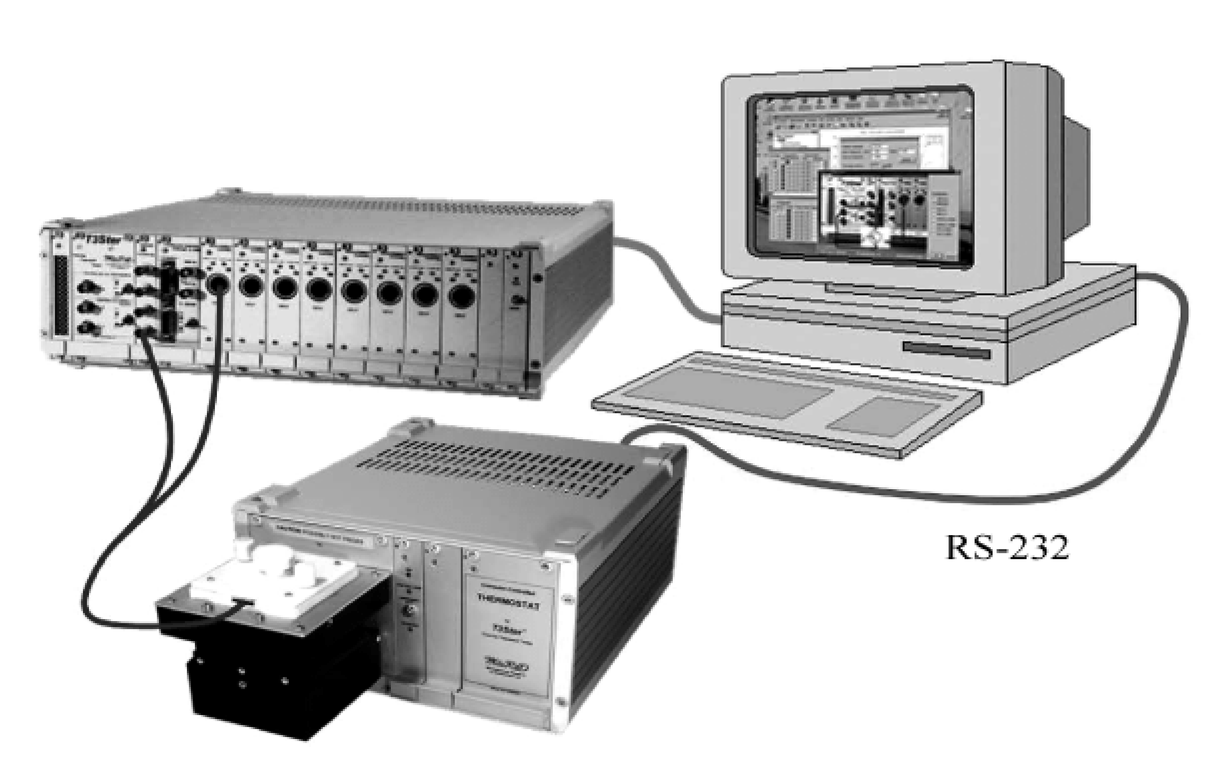


图 B-15　测试主机 T3Ster Mainsys 和 Thermostat 干式恒温槽与控制电脑连接

Thermostat 干式恒温槽可以用来：

(1) 测量和校准被测半导体器件的温度敏感参数；

(2) 在瞬态热测试中，提供稳定的环境温度。

T3Ster 系统的控制软件可以自动控制 Thermostat 干式恒温槽和测试主机 T3Ster Mainsys 对被测半导体器件的温度敏感参数进行测量和校准。将测量的结果做线性或者多项式拟合，从而测量和校准出被测半导体器件的温度敏感参数，如图 B-16 所示。供以后在 T3Ster-Master 评估和分析软件中使用。

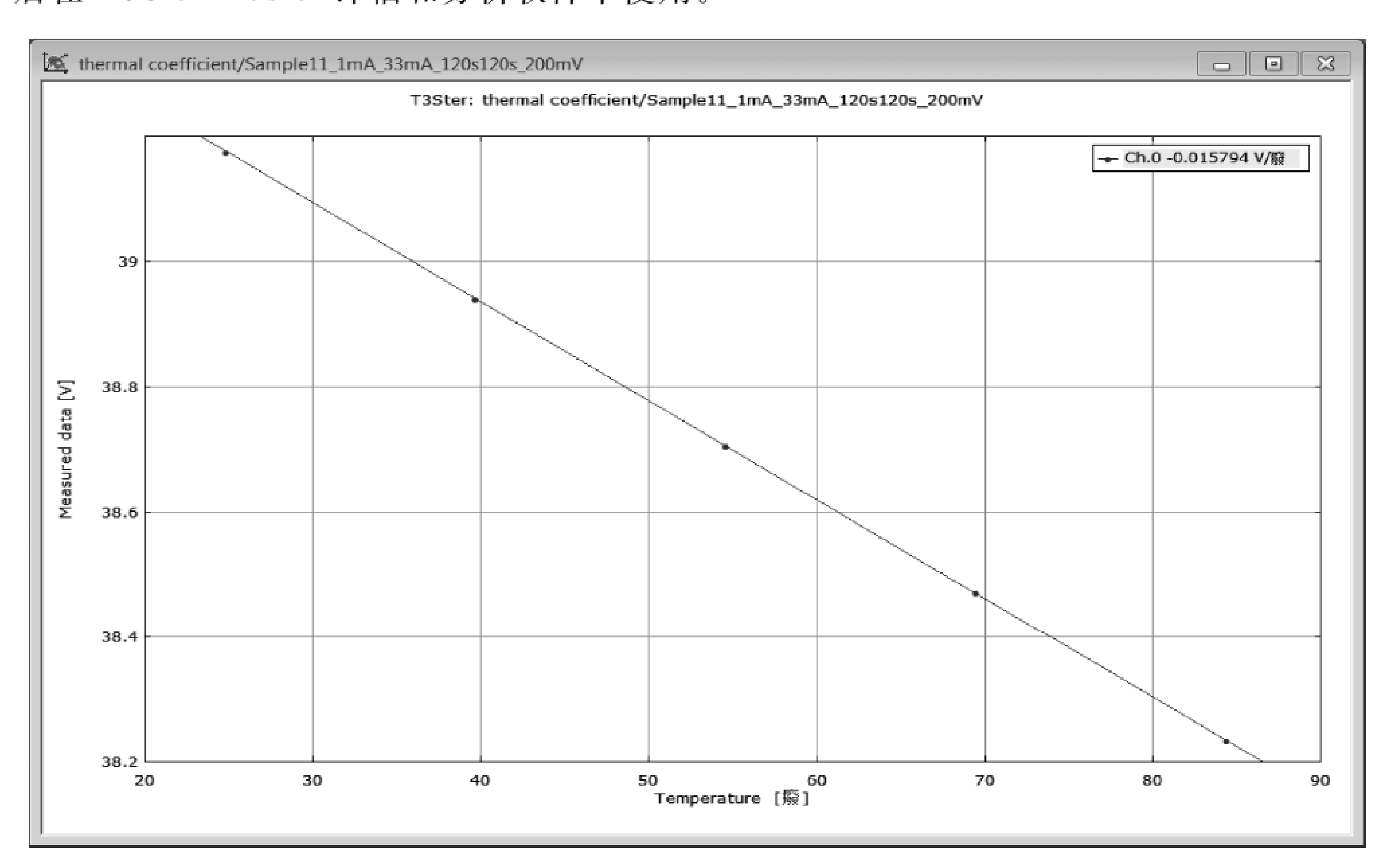


图 B-16 校准后的被测半导体器件的温度敏感参数

Thermostat 干式恒温槽的技术参数如表 B-5 所示。

表 B-5 Thermostat 干式恒温槽的技术参数

温度控制范围	5～90℃
温度控制精度	±0.2℃
恒温槽开口尺寸	46mm×46mm×10mm
最大耗散功率	8W(高于 30℃时)
控制方式	EIA RS232

B.7 T3Ster 系统其余主要配件介绍

T3Ster 系统还提供了另外一些主要配件，包括：Thermocouple pre-amplifier 热电偶前置放大器、Reference Device 校准金品、Still Air Environment 静态空气箱、Dual-cold

plate 双冷板以及 TeraLED 光学测试设备以及与之配合使用的积分球。

1）Thermocouple pre-amplifier 热电偶前置放大器

T3Ster 系统提供了 Thermocouple pre-amplifier 热电偶前置放大器，如图 B-17 所示，可以方便的将 J 型、K 型以及 T 型热电偶与之相连，并接入到测试主机 T3Ster Mainsys 的测量通道内对待测的任意一点温度通过热电偶进行测量。



图 B-17　T 型热电偶前置放大器

Thermocouple pre-amplifier 热电偶前置放大器的主要参数为：适配的热电偶型号：J 型、K 型和 T 型；输出电压：100mV（在 25℃ 下）；输入阻抗：2kΩ；温度敏感参数：4mV/℃±1%。

热电偶测量点的温度和热电偶采集到的电压之间的关系是弱非线性的。Thermocouple pre-amplifier 热电偶前置放大器提供了一个最佳线性计算。考虑到非线性的存在，表 B-6 提供了建议的热电偶测量范围和最大测量误差。

表 B-6　建议的热电偶测量范围和最大测量误差

型　号	测量范围(℃)	最大误差(℃)
J	0～100	±0.5
K	−10～110	±0.5
T	5～95	±1

2）Reference Device 参考金品

T3Ster 系统提供一个 Reference Device 参考金品对测试主机 T3Ster Mainsys 的驱动电源单元和数据测量采集单元（测试通道）进行检查，以确保测试主机 T3Ster Mainsys 测量的正确性，建议的检查周期为 1 次/年。

Reference Device 校准金品是一个高精度的测量工具，如图 B-18 所示，在校准过程中并没有热量的产生。它可以对测试主机 T3Ster Mainsys 的受控可编程电压源 U_{BC}、受控可编程电流源 I_E 以及数据测量采集单元（测试通道）的时序进行检查。检查的结果可作为 T3Ster 系统是否需要进行校准的判断依据。

3）Still AirEnvironment 静态空气箱

T3Ster 系统提供一个符合 JEDEC 组织 JESD51-2A 标准的 Still Air Environment



图 B-18　Reference Device 参考金品

静态空气箱，如图 B-19 所示，作为瞬态热测试的测试环境使用。Still Air Environment 静态空气箱可以保证被测半导体器件处于自然对流的情况下进行瞬态热测试。

Still AirEnvironment 静态空气箱的尺寸为 305mm×305mm×305mm，材质使用低热导率的材料（<0.5W/(m·K)）制成。



图 B-19　符合 JEDEC 组织 JESD51-2A 标准的 Still Air Environment 静态空气箱

4）Dual-cold plate 双冷板

当测试的被测半导体器件的耗散功率大于 8W 时，例如大功率 COB 封装的 LED 器件，Thermostat 干式恒温槽则不能提供稳定的环境温度作为瞬态热测试的环境使用。或者当被测半导体器件的尺寸大于 Thermostat 干式恒温槽的开口尺寸时，Thermostat 干式恒温槽无法容纳该被测半导体器件进行温度敏感参数的测量和校准以及进行瞬态热测试。此时，T3Ster 系统提供一个 Dual-cold plate 双冷板供瞬态热测试使用，其外形尺寸和内部结构如图 B-20 所示。

Dual-cold plate 双冷板配合第三方的油冷循环设备，不仅可用于对被测半导体器件的温度敏感参数进行测量和校准，还可用于瞬态热测试时提供稳定环境温度的测试环境。

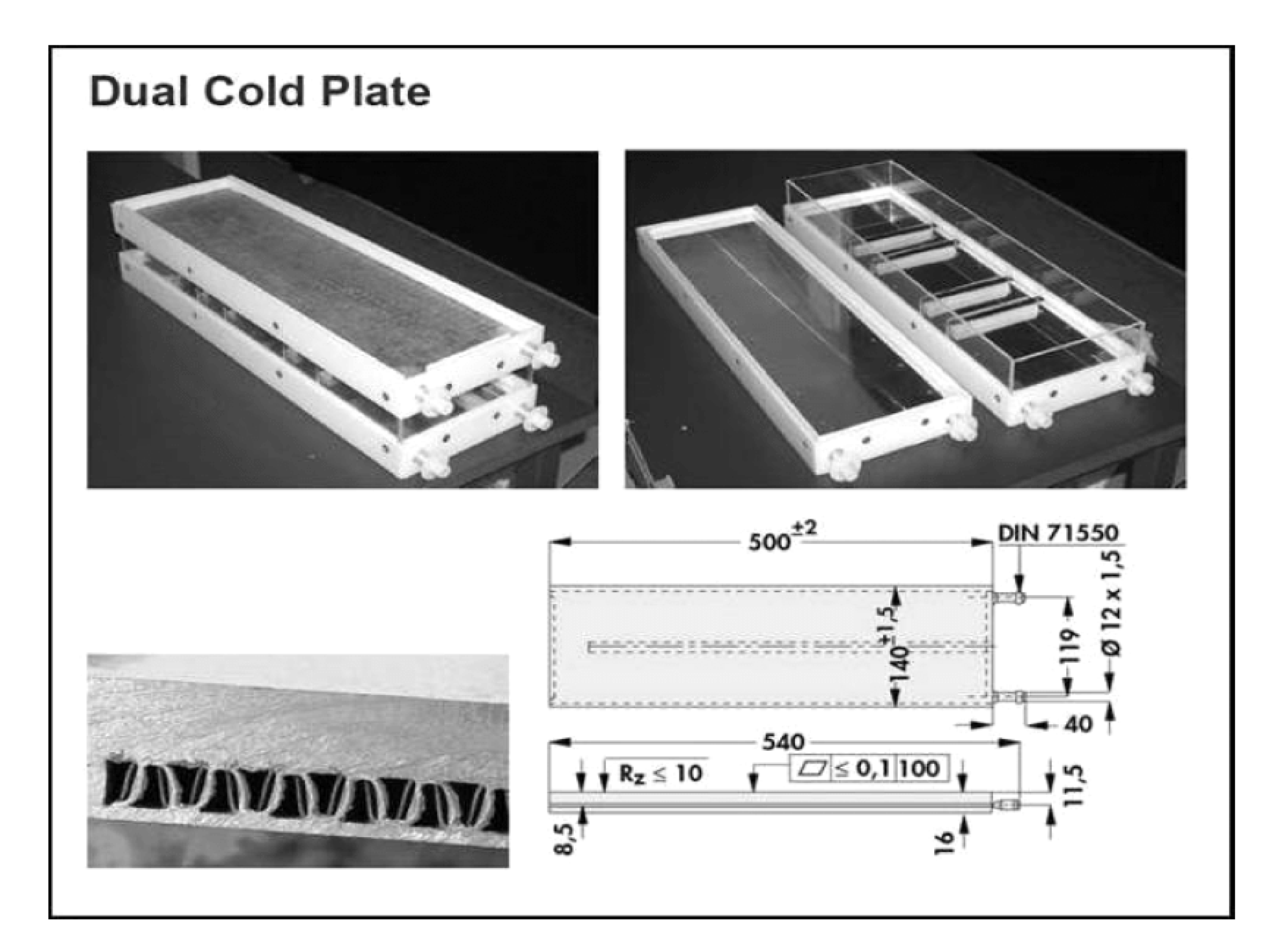


图 B-20　Dual-cold plate 双冷板的外形尺寸以及内部结构

两块冷板完全相同，并且可以为被测半导体器件提供较高的热传递系数。两块冷板也可以拆开单独使用。根据 JEDEC 组织 JESD51-14 标准，它们可用作结壳热阻测量的测试环境。双冷板可以与第三方油冷循环设备一起使用。除了控制 Thermostat 干式恒温槽之外，在 T3Ster 系统的控制软件中还可以手动或自动控制第三方油冷循环设备。

Dual-cold plate 双冷板的技术规格如下：

(1) 冷板材质：硬质铝；

(2) 冷板上螺丝孔：M4×18 个(孔深约 4 毫米)；

(3) 水管入口/出口：9 毫米的内径，12 毫米的外径(为了防止泄漏，建议使用内径为 10mm 的橡胶软管进行连接)；

(4) 散热能力在 25℃室温下约为：50W(不能控制环境温度)；

(5) 与外部油冷循环设备进行工作，散热能力可达 KW 级(温度控制允许的油冷循环设备)。

B.8　TeraLED 光学测试设备以及与之配合使用的积分球

在瞬态热测试中，如果被测半导体器件是 LED 器件，输入的电功率中会有相当一部分转换为光功率输出，因此，为了获得被测 LED 器件真实的热阻，必须对被测 LED 器件的光学属性进行测试。

TeraLED 设备作为 T3Ster 系统的一部分，配合 T3Ster 系统可以自动对被测 LED 器件的光学属性进行测试，获得被测 LED 器件的热学属性和光学属性，并且还能以结温

(或者环境温度)和工作电流函数的形式,输出热学指标以及其他属性,例如光功率、光效和光通量等。

被测 LED 器件光学属性的测试在热平衡条件下进行,在 TeraLED 设备的积分球内完成光学属性的测试后,被测 LED 器件的加热电流会被关闭,T3Ster 系统会进行瞬态热测试。TeraLED 设备可以与 T3Ster Booster 和测试主机 T3Ster Mainsys 协同进行工作。

TeraLED 设备使用 Optical Filter 和 Reference LED 等配有高精度检测器的系统来执行光学属性的测试。

TeraLED 设备的积分球包含控温热沉,可以作为被测 LED 器件的安装夹具使用,还包括 Reference LED 和 Optical Filter。积分球上还有光纤端口允许连接光谱仪这样的外部设备。TeraLED 设备的积分球分为两种:直径为 30cm 的积分球和直径为 50cm 的积分球,分别如图 B-21 和图 B-22 所示。



图 B-21　积分球直径为 30cm 的 TeraLED 设备



图 B-22　积分球直径为 50cm 的 TeraLED 设备

TeraLED 设备将所有连接至积分球的附属设备与 T3Ster 系统的控制计算机相连。通过对被测 LED 器件施加输入功率,可以对被测 LED 器件进行单独的光学属性测试。当和 T3Ster 系统一起工作时,可以通过测试主机 T3Ster Mainsys 或者 T3Ster Booster 对被测 LED 器件施加输入功率,进行光、热、电联合测试。

积分球直径为 30cm 的 TeraLED 设备提供了一个内径为 55mm 的通过珀尔帖效应制冷的控温热沉,如图 B-23 所示,可以获得 $40\times40mm^2$ 的安装面积以及在 5～90℃ 的 10W 的制冷能力。

对于积分球直径为 50cm 的 TeraLED 设备,提供了内径为 120mm、散热能力约为 50W 的液冷冷板。通过机械适配器,同样兼容积分球直径为 30cm 的 TeraLED 设备具有的内径为 55mm 的通过珀尔帖效应制冷的控温热沉。为了使用液冷冷板,TeraLED 设备测量和控制软件与 T3Ster 系统控制软件支持第三方的油冷循环设备。

TeraLED 设备的测试选项,包括:

(1) 被测 LED 器件的温度敏感参数;

(2) 热平衡条件下的光学属性。

被测 LED 器件被施加恒定的输入电流,在达到热平衡的条件下进行测量,通过



图 B-23　TeraLED 设备积分球上的控温热沉

Optical Filter 可以获得总辐射通量、总光通量和暗视觉光通量、光效以及能量转换效率、色坐标、色温，以结温与工作电流函数形式测量的光学属性，如图 B-24 所示。扣除掉光功率后，使用真正的热功率计算的热阻，热学测试报告，脉冲热阻曲线。

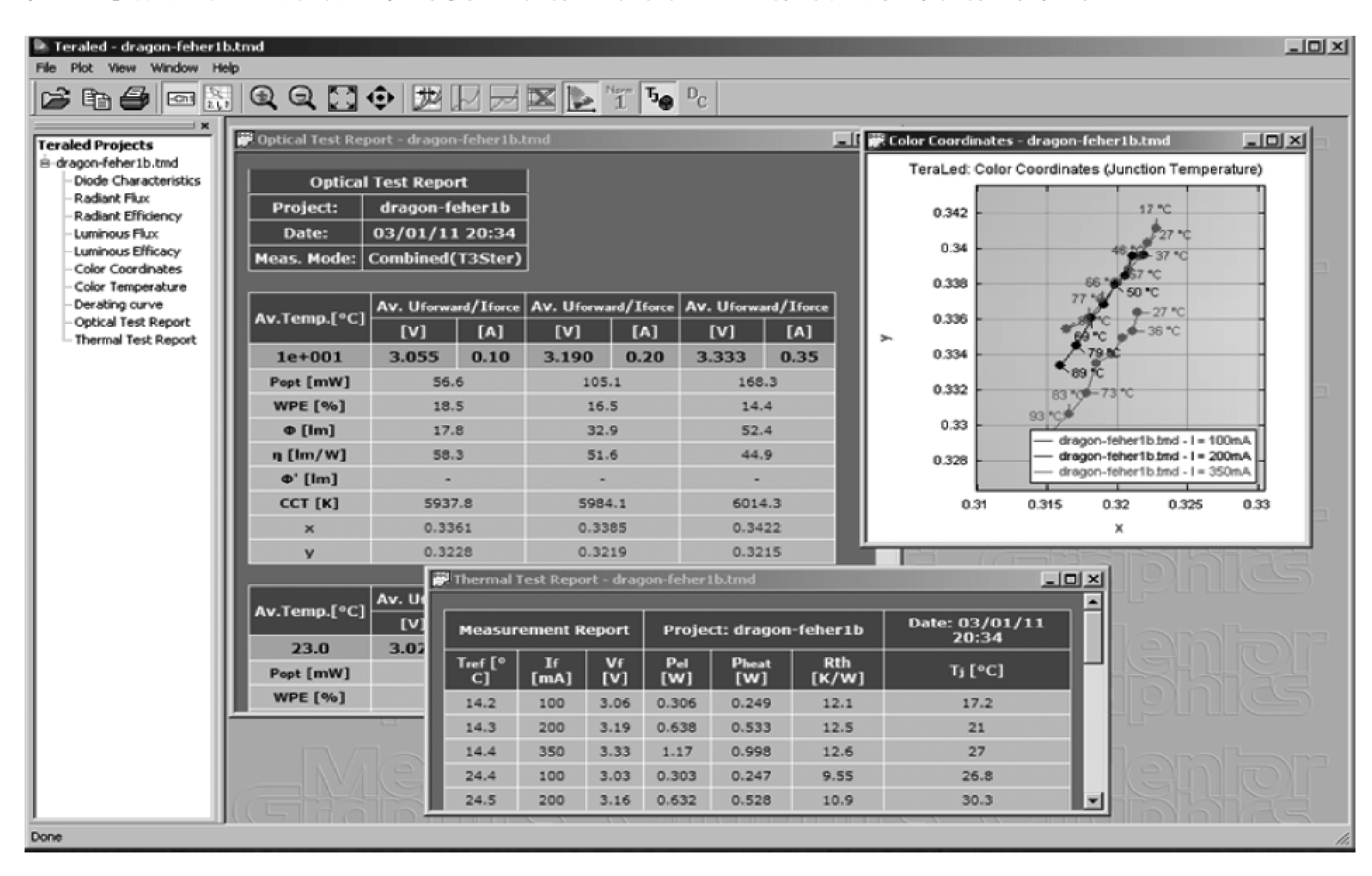


图 B-24　TeraLED 设备的测试结果—光学属性测试报告

附录 C　空气在 1atm（101.33kPa）下的物理性质

T /℃	ρ /(kg/m³)	C_p /(J/kg℃)	$\mu\times10^6$ /(N·s/m²)	$v\times10^6$ /(m²/s)	k /(W/m℃)	$\alpha\times10^6$ /(m²/s)	P_r
−20	1.3947	1004.44	16.23	11.63	0.0225	16.08	0.7236
−10	1.3417	1004.71	16.73	12.47	0.0233	17.28	0.7216
0	1.2926	1005.06	17.23	13.33	0.0241	18.52	0.7198
10	1.2469	1005.50	17.72	14.21	0.0248	19.79	0.7181
20	1.2044	1006.02	18.21	15.12	0.0256	21.10	0.7165
30	1.1647	1006.62	18.68	16.04	0.0263	22.43	0.7150
40	1.1275	1007.30	19.15	16.98	0.0270	23.80	0.7137
50	1.0926	1008.06	19.61	17.95	0.0277	25.19	0.7124
60	1.0598	1008.88	20.06	18.93	0.0285	26.62	0.7112
70	1.0289	1009.78	20.51	19.93	0.0292	28.07	0.7101
80	0.9998	1010.75	20.95	20.95	0.0299	29.55	0.7091
90	0.9722	1011.79	21.38	21.99	0.0305	31.06	0.7081
100	0.9462	1012.89	21.81	23.05	0.0312	32.59	0.7073
110	0.9215	1014.05	22.23	24.13	0.0319	34.15	0.7064
120	0.8980	1015.28	22.65	25.22	0.0326	35.74	0.7057
130	0.8758	1016.56	23.06	26.33	0.0333	37.35	0.7050
140	0.8546	1017.90	23.47	27.46	0.0339	38.99	0.7044
150	0.8344	1019.30	23.87	28.61	0.0346	40.65	0.7038
160	0.8151	1020.74	24.27	29.77	0.0352	42.34	0.7033
170	0.7967	1022.25	24.66	30.96	0.0359	44.05	0.7028
180	0.7791	1023.80	25.05	32.15	0.0365	45.78	0.7024
190	0.7623	1025.39	25.44	33.37	0.0372	47.53	0.7020
200	0.7462	1027.04	25.82	34.60	0.0378	49.31	0.7016
210	0.7308	1028.72	26.19	35.84	0.0384	51.11	0.7013
220	0.7159	1030.45	26.57	37.11	0.0391	52.93	0.7010
230	0.7017	1032.23	26.94	38.39	0.0397	54.78	0.7008
240	0.6880	1034.04	27.30	39.68	0.0403	56.64	0.7005
250	0.6749	1035.88	27.66	40.99	0.0409	58.82	0.7003
260	0.6622	1037.77	28.02	42.31	0.0415	60.43	0.7001
270	0.6500	1039.68	28.37	43.65	0.0421	62.36	0.7000
280	0.6383	1041.63	28.72	45.00	0.0428	64.30	0.6998
290	0.6269	1043.61	29.07	46.36	0.0434	66.27	0.6997
300	0.6160	1045.62	29.41	47.74	0.0440	68.25	0.6995

附录 D　饱和水/水蒸气的性质

T /℃	P /kPa	ρ /(kg/m^3)		h_{fg} /(kJ/kg)	C_P /(J/kg℃)		$\frac{C_p}{C_v}$	$\mu\times10^4$ /(NS/m^2)		k /(W/m℃)		P_r		$\sigma\times10^3$ /(N/m)
		液态	气态		液态	气态	气态	液态	气态	液态	气态	液态	气态	
0.01	0.61	999.8	0.0049	2501	4220	1884	1.329	1791.2	9.22	0.5610	0.0171	13.4739	1.0176	75.65
10	1.23	999.7	0.0094	2477	4196	1895	1.328	1306.0	9.46	0.5800	0.0176	9.4482	1.0174	74.22
20	2.34	998.2	0.0173	2454	4184	1906	1.327	1001.6	9.73	0.5984	0.0182	7.0032	1.0173	72.74
30	4.25	995.6	0.0304	2430	4180	1918	1.327	797.4	10.01	0.6155	0.0189	5.4153	1.0164	71.19
40	7.38	992.2	0.0512	2406	4180	1931	1.327	653.0	1031	0.6306	0.0196	4.3285	1.0157	69.60
50	12.35	988.0	0.0831	2382	4182	1947	1.328	546.8	10.62	0.6436	0.0204	3.5530	1.0156	67.94
60	19.95	983.2	0.1304	2358	4185	1965	1.328	466.4	10.93	0.6543	0.0212	2.9832	1.0136	66.24
70	31.20	977.7	0.1984	2333	4190	1986	1.330	403.9	11.26	0.6631	0.0221	2.5522	1.0132	64.48
80	47.41	971.8	0.2937	2308	4197	2012	1.332	354.3	11.59	0.6700	0.0230	2.2194	1.0134	62.67
90	70.18	965.3	0.4239	2282	4205	2043	1.334	314.4	11.93	0.6753	0.0240	1.9577	1.0147	60.82
99.97	101.33	958.4	0.5977	2256	4216	2080	1.337	281.8	12.27	0.6791	0.0251	1.7495	1.0172	58.92
100	101.42	958.3	0.5982	2256	4216	2080	1.341	281.7	12.27	0.6791	0.0251	1.9489	1.0168	58.91
110	143.38	950.9	0.8269	2230	4228	2124	1.346	254.7	12.61	0.6817	0.0262	1.5797	1.0207	56.96
120	198.67	943.1	1.1221	2202	4244	2177	1.352	232.1	12.96	0.6832	0.0275	1.4418	1.0271	54.97
130	270.28	934.8	1.4970	2174	4261	2239	1.359	212.9	13.30	0.6837	0.0288	1.3268	1.0354	52.93
140	361.54	926.1	1.9668	2144	4283	2311	1.358	196.5	13.65	0.6833	0.0301	1.2317	1.0466	50.86
150	476.16	917.0	2.5481	2114	4307	2394	1.379	182.5	13.99	0.6820	0.0316	1.1525	1.0599	48.74
160	618.23	907.4	3.2597	2082	4335	2488	1.392	170.2	14.34	0.6800	0.0331	1.0850	1.0769	46.59
170	792.19	897.5	4.1222	2049	4368	2594	1.392	159.6	14.68	0.6770	0.0348	1.0297	1.0958	44.41

续表

T /℃	P /kPa	ρ /(kg/m³)		h_{fg} /(kJ/kg)	C_P /(J/kg℃)		$\frac{C_p}{C_v}$	μ×10⁴ /(NS/m²)		k /(W/m℃)		P_r		σ×10³ /(N/m)
		液态	气态		液态	气态	气态	液态	气态	液态	气态	液态	气态	
180	1002.80	887.0	5.1589	2014	4405	2713	1.407	150.1	15.03	0.6733	0.0365	0.9820	1.1187	42.19
190	1255.20	876.1	6.3955	1978	4447	2844	1.452	141.8	15.37	0.6688	0.0382	0.9429	1.1431	39.95
200	1554.90	864.7	7.8610	1940	4496	2990	1.447	134.3	15.71	0.6633	0.0401	0.9103	1.1711	37.67
210	1907.70	852.7	9.5886	1900	4551	3150	1.472	127.6	16.06	0.6570	0.0421	0.8839	1.2019	35.38
220	2319.60	840.2	11.6158	1857	4615	3329	1.501	121.5	16.41	0.6497	0.0442	0.8630	1.2368	33.07
230	2797.10	827.1	13.9860	1813	4688	3528	1.536	116.0	16.76	0.6413	0.0464	0.8480	1.2749	30.74
240	3346.90	813.4	16.7504	1765	4772	3754	1.578	110.9	17.12	0.6318	0.0487	0.8376	1.3189	28.39
250	3976.20	798.9	19.9681	1715	4870	4011	1.627	106.1	17.49	0.6212	0.0513	0.8318	1.3686	26.04
260	4692.30	783.6	23.7135	1662	4986	4308	1.686	101.7	17.88	0.6092	0.0540	0.8324	1.4256	23.69
270	5503.00	757.5	28.0741	1604	5123	4656	1.757	97.5	18.28	0.5959	0.0571	0.8382	1.4903	21.34
280	6416.60	750.3	33.1675	1543	5289	5073	1.845	9305	18.70	0.5811	0.0606	0.8510	1.5652	18.99
290	7441.80	731.9	39.1389	1477	5493	5582	1.954	89.7	19.15	0.5650	0.0647	0.8721	1.6519	16.66
300	8587.90	712.1	46.1681	1405	5750	6220	2.094	85.9	19.65	0.5474	0.0697	0.9023	1.7548	14.36
310	9865.10	690.7	54.5554	1326	6085	7045	2.277	82.2	20.21	0.5287	0.0758	0.9461	1.8774	12.09
320	11284.30	667.1	64.6412	1238	6537	8159	2.528	78.4	20.85	0.5092	0.0839	1.0065	2.0274	9.86
330	12858.10	640.8	77.0416	1140	7186	9753	2.889	74.5	21.61.	0.4891	0.0949	1.0946	2.2200	7.70
340	14600.70	610.7	92.7644	1027	8210	12240	3.450	70.4	22.55	0.4685	0.1109	1.2337	2.4886	5.63
350	16529.40	574.7	113.6364	893	10120	16690	4.460	65.9	23.82	0.4474	0.1360	1.4906	2.9243	3.67
360	18666.00	527.6	143.8849	720	15000	27360	6.830	60.3	25.72	0.4257	0.1815	2.1247	3.8769	1.88
370	21043.60	451.4	202.0202	444	45160	96600	21.150	52.1	29.68	0.4250	0.3238	5.5361	8.8534	0.39
373.95	22064.00	322.0	321.5434	0	∞	∞	∞	—	—	∞	∞	—	—	0.00